

文章编号: 1000-8055(2007)11-1820-06

宽高比对尾向可见明火矩形喷管红外抑制特性影响研究

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

摘 要: 以国外某型先进无人机上使用的涡扇发动机为基础, 缩比 4.3 倍得到轴对称收敛喷管 AR0, 并在出口面积相同的条件下改变喷口形状得到 5 组不同宽高比 ($W/H = 1 \sim 16$) 的矩形喷管模型 (AR1~AR16). 用傅立叶红外光谱仪对喷管与热喷流在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段上的红外辐射进行了测试. 研究发现, 与轴对称喷管相比, 矩形喷管减小了红外源的辐射, 起到了明显的红外抑制作用, 并且其红外抑制特性随着宽高比的增大是逐渐增强的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 红外抑制; 矩形喷管; 大宽高比; 双涵道
中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A

Research of the influence of aspect ratio on infrared suppressing characteristics of rectangular nozzles

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

Abstract: Based on a fanjet currently used in an advanced unmanned vehicle, an axisymmetric nozzle AR0 of 4.3 expansion ratio was obtained. Under the same exit area, five rectangular convergent nozzle models (AR1~AR16) of different W/H ($W/H = 1 \sim 16$) were experimentally investigated. The infrared radiation of nozzles and hot jet streams at $3 \sim 5 \mu\text{m}$ were tested using Fourier Infrared Spectroscope. The results indicate that the magnitude of infrared radiation from rectangular nozzle is smaller than axisymmetric one, and the infrared suppressing effect of rectangular nozzles improves with the increase of aspect ratio.

Key words: aerospace propulsion system; infrared suppressing; rectangular nozzle; aspect ratio; double channels

航空发动机的尾喷流是飞机的一个重要红外辐射源, 其红外辐射能量主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段内. 尾喷流红外辐射强度大小直接影响到飞机被敌方探测到的可能性, 尤其是在前向和侧向探测时, 其作用更大. 传统的轴对称喷管红外辐射较强, 而矩形喷管不仅具有低红外、雷达低散射特征^[1], 而且气动性能优越, 因此采用矩形喷管是提高战斗机隐身性能的一条重要技术途径.

矩形喷管具有较好的红外抑制特性^[2], 山骐骥^[3]针对涡喷发动机进行了实验研究, 指出矩形喷管的红外辐射具有明显的方向性. 郑礼宝^[4]利用涡喷 7 发动机研究了宽高比为 2.25 的矩形喷管的红外辐射特性, 发现在推力相等的条件下, 二元喷管明显降低了发动机的红外辐射强度.

本文采用模拟实验的方法研究了尾部可见明火状态下, 喷口宽高比的变化对涡扇发动机混合

收稿日期: 2006-11-14; 修订日期: 2007-02-06

作者简介: 张勃(1976-), 江苏南京人, 沈阳航空发动机设计研究所在职博士后, 讲师, 主要从事红外隐身及强化传热的研究.

排气矩形喷管的红外光谱辐射特性的影响.在相近的天气状态状况(晴天、傍晚、无风)、相同喷管出口截面积、燃气温度及相同的测量距离(20 m)条件下,测量了二元喷管在 3~5 μm 波段内的红外光谱辐射强度,得出了宽高比在 1~16 之间的 5 组矩形收敛喷管的红外光谱辐射强度分布,并且将二元喷管和基准轴对称喷管的红外光谱辐射强度进行了比较.发现矩形喷管的红外抑制效果明显强于轴对称喷管,且红外抑制特性随着宽高比增大而逐渐提高.文中还给出了利用红外热像仪拍摄得到的喷管尾焰温度图,发现尾焰高温区长度随着喷管宽高比增大而减小.

1 实验设备

本文模仿涡扇发动机的双涵道结构进行设计,实验设备如图 1 所示,主要包括收敛喷管、内涵、外涵、燃烧室等,内、外涵气流分别由两台风机提供,流量比约为 1 : 4,燃烧室为“子爵”号飞机上用的达特单管燃烧室.为了控制调节方便,加装了供油系统以及点火系统控制台.燃烧室出口没有安装中心锥,以模拟尾部可见明火状态.内涵燃气出口如图 2 所示,温度保持在 910 K,实验中采用航空煤油为燃料.

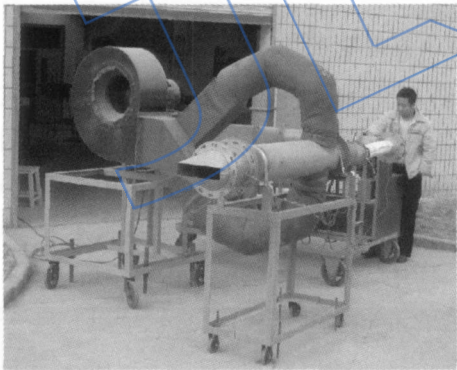


图 1 试验装置图
Fig. 1 Experimental rig

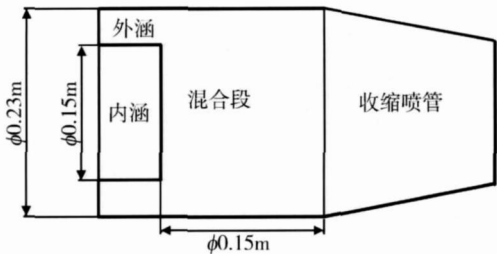


图 2 喷管示意图
Fig. 2 Sketch of the nozzle

喷管采用混合排气方式,具体结构见图 2 所示,内外涵管径分别为 0. 15 m,0. 23 m,混合段长度为 0. 15 m,气流经过混合段后再进入渐缩喷管,由本文研究的矩形喷口流出(不同喷管的尺寸参数见表 1 所示).

表 1 喷管的几何参数
Table 1 Parameters of the nozzles

模型 编号	喷管尺寸/ m			宽高比 W/ H	湿边周长/ m C
	H	W	L		
AR1	0. 14	0. 14	0. 145	1	0. 56
AR4	0. 071	0. 284	0. 145	4	0. 71
AR8	0. 050	0. 4	0. 145	8	0. 90
AR12	0. 041	0. 491	0. 145	12	1. 06
AR16	0. 035	0. 567	0. 145	16	1. 20
AR0	$\Phi_1 = 0. 21$		0. 145		0. 50
	$\Phi_2 = 0. 16$				

2 实验模型与测试仪器

本文以国外某型先进的涡扇发动机为基础,将其喷管尺寸缩小 4. 3 倍得到本文的轴对称喷管模型,记作 AR0,然后在保持出口面积相同的前提下,将轴对称出口改为矩形喷口,圆到矩形过渡型面则采用 Wallance^[5]提出的圆到矩形简单过渡形式.如图 3 所示,喷管宽边侧与窄边侧主要由两个宽边三角形、两个窄边三角形组成.宽边三角形与窄边三角形之间通过圆锥面相连,这种型面已经在某型飞机上进行过实验,起到了较好的红外抑制作用,而且这种结构制造工艺相对简单,易于实现.

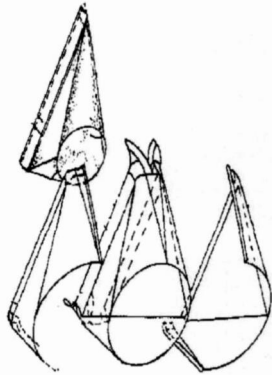


图 3 过渡型面图
Fig. 3 Transtion shape of circle to rectangular

表 1 中列出了本文研究的 6 个喷管模型的几何参数,轴对称模型命名为 AR0(0 表示轴对称喷管),而其余 5 个矩形喷管模型则根据其不同的宽

高比分别命名为 AR1~AR16,这 6 个模型的进口面积均为 0.04 m^2 ,出口面积则均为 0.02 m^2 ,喷管长度均为 0.145 m .可以看出,轴对称喷管的湿边周长最小,矩形喷管的湿边周长较大,随着宽高比的增大,喷管湿边周长变大,即射流与周围环境的接触面积增大,掺混增强.

实验中分别采用 TVS2000-MK 红外热像仪和 MR104 傅立叶变换红外光谱辐射计来拍摄热喷流的温度图和测量喷管的红外辐射强度.实验中对两个相互正交对称的平面内的红外辐射进行了测量,一个对称面为宽边对称面,另一个则为窄边对称面,并且在两个探测面内测量了不同方向角 α 的光谱辐射强度,如图 4 所示.对于宽高比为 1 的 AR1 正方形喷口,在实验中仅测量了一个对称面上的光谱辐射强度分布.由于矩形喷管不具有轴对称性,实验分别对矩形喷管的宽边与窄边

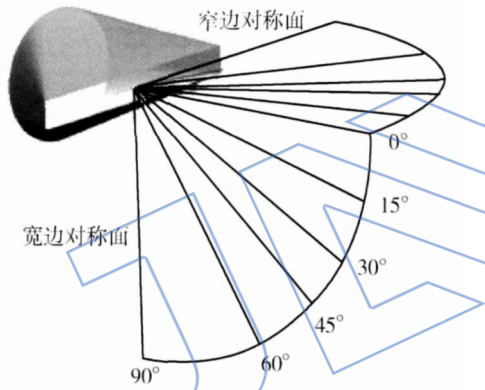


图 4 测量平面图
Fig. 4 Sketch of measuring planes

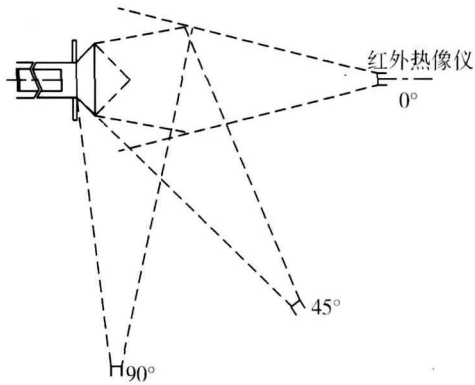


图 5 不同测量角度示意图
Fig. 5 Sketch of detectable region from different angles

侧(图 4) 进行.实验在 $0^\circ\sim90^\circ$ 的范围内进行(图 5),探测器距离目标源距离为 20 m (图 5),此时,目标可以视为点源处理,图中虚线表示探测器的探测范围.为了避免实验设备本身的红外辐射信号干扰,实验中采用亚光漆涂黑的木板进行遮挡,这不仅屏蔽了尾喷管外壁面与环境的红外辐射,而且可以减少木板本身对环境和喷管的入射辐射的反射.实验中利用标准黑体对测量结果进行校验,保证测量精度可靠,实验数据处理方法同文献 [6].

3 实验结果与分析

3.1 不同喷管的热喷流热像图

图 6 中给出了在各个模型的宽边侧 90° 方向利用红外热像仪拍摄得到的热喷流热像图,此角度上,由于木板遮挡探测区域中不包含喷管壁面辐射.为利于比较,每张图的长度均定为 1 m .

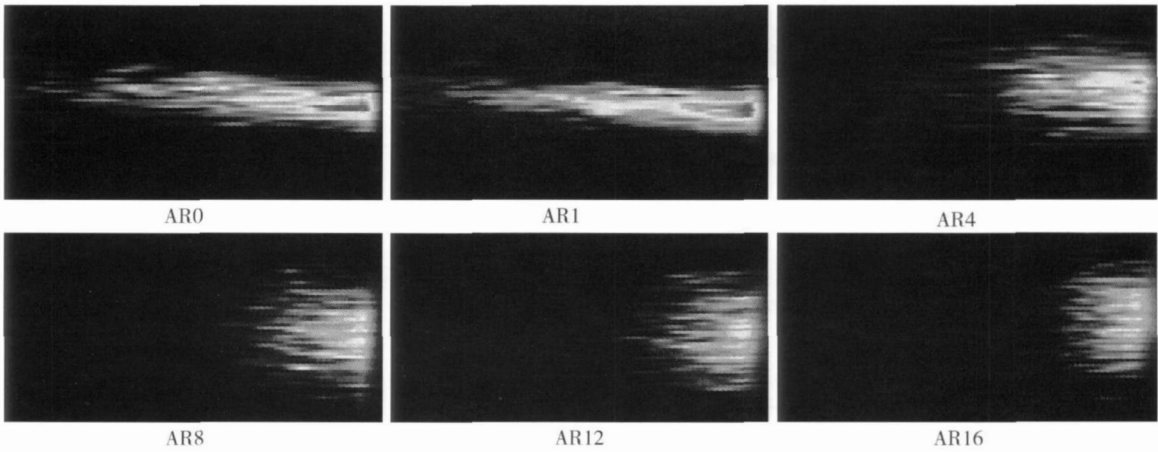


图 6 尾焰热像图
Fig. 6 Thermal image of the hot gas

从图 6 中可以看出,轴对称模型 AR0 热喷流的高温区最长,而正方形喷管 AR1 的热喷流高温区长度比轴对称模型略有缩短.而当喷管的宽高比增大至 4 时,热喷流长度则明显缩短,同时宽度也有所增大.宽高比增大到 8 时,热喷流长度相比 AR4 继续缩短,且宽度没有明显增大.宽高比继续增大,热喷流长度与宽度则变化较小.从图中还可以明显看出,由于实验中采用双涵道结构,引进的外涵冷气流不仅起到了增强掺混的作用,还在热喷流的外侧形成了一层低温气体包裹层.从图中还可以看出,当宽高比较大($W/H \geq 4$)时,热射流不再如轴对称喷管那样成集中成束分布,而是变为分散的羽状分布,大大增大了热喷流与外流的接触面积,促进了热喷流的掺混.

3.2 红外光谱辐射强度随喷管宽高比的变化

图 7 中给出了不同喷管在 0° (喷管正后方) 探测时, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段内的光谱辐射强度的分布曲线.可以看出,轴对称收敛喷管 AR0 的光谱辐射强度最大,达到 32 W/sr . 正方形喷管 AR1 光谱强度略有降低,在整个 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内,其强度均小于 AR0,随着宽高比的增大,光谱辐射强度逐渐减小.但是当宽高比大于 8 以后,降低幅度明显减小.

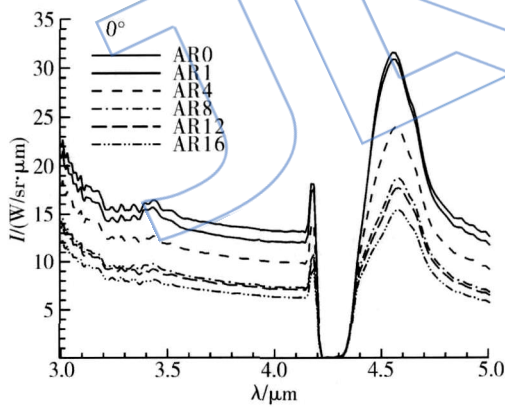


图 7 0° 测量红外光谱分布
Fig. 7 Infrared radiation spectrum of 0 degree

图 7 中各个不同喷管与热喷流的光谱辐射强度随波长变化趋势相同,表现出明显的光谱特性.其光谱在 $3 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 范围内出现一系列波动,这是由于大气中水蒸气的吸收、燃气中水蒸气和碳氢化合物气体的吸收-发射造成的^[7-8].

在 $3.5 \sim 4.16 \mu\text{m}$ 波段范围内,光谱辐射强度大致成直线形状,这主要由于在该波段大气的吸收很微弱,水蒸气与部分未燃尽的固、液体颗粒是燃气中参与辐射换热的主要部分,这些介质在

该波段的吸收系数均很低,因此在该波段,喷管的光谱辐射特性主要是喷管固体壁面的吸收与发射决定的.

在 $4.16 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 范围内,由于燃气中的二氧化碳气体具有强烈的吸收与发射作用,使得光谱辐射强度曲线在 $4.18 \mu\text{m}$ 与 $4.6 \mu\text{m}$ 处出现峰值.在峰值两侧,光谱强度值明显降低;同时由于大气在 $4.26 \mu\text{m}$ 附近的光谱透过率接近零,导致光谱曲线在 $4.26 \mu\text{m}$ 附近出现峰谷分布.

在 $4.8 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 范围内,固体壁面辐射占据主要地位,光谱辐射强度曲线存在一定波动,总体表现为随波长增加而下降的趋势;大气吸收很微弱,水蒸气和一氧化碳的贡献较小,仅仅表现为光谱辐射强度曲线的细微波动.

比较不同喷管的光谱强度曲线可以发现,相同波段上,轴对称喷管光谱辐射强度幅值最大,矩形喷管光谱辐射强度较小,并且随着宽高比增大进一步减小.

图 8(a) 和 (b) 分别给出了当测量角度为 30° 时各个喷管的宽边与窄边的光谱强度图,轴对称喷管 AR0 与正方形喷管 AR1 强度值相近,矩形

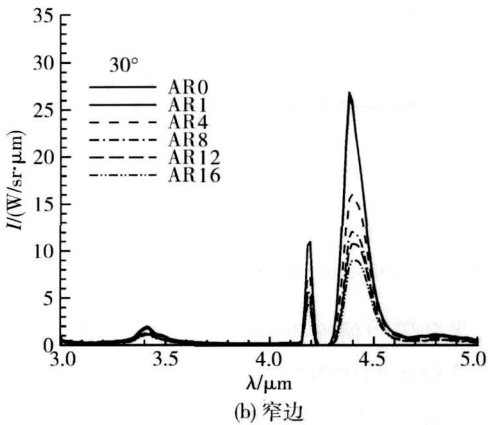
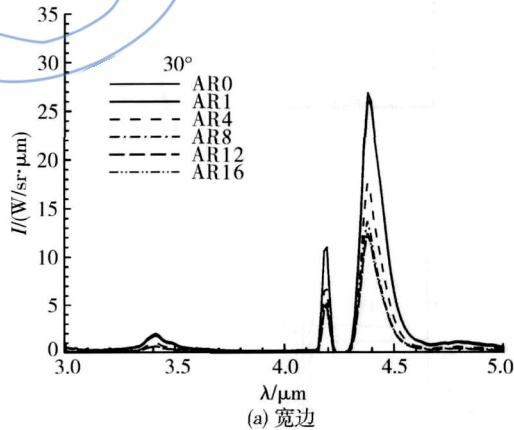


图 8 30° 测量红外光谱分布
Fig. 8 Infrared radiation spectrum of 30 degree

喷管宽边与窄边光谱强度曲线分布规律相近,其峰值分别出现在 $4.18\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 附近,与 0 结果相比, $4.6\text{ }\mu\text{m}$ 处的峰值左移至 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 附近. 在 $\lambda = 3.4\text{ }\mu\text{m}$ 附近,光谱强度曲线也存在峰值,分析认为,这是由于 HCl 气体在该波段上的吸收与发射造成的^[7-8],在图 7 的 0 结果中,此峰值相对较小,所以并不明显.

图 9 与图 10 中分别给出了 45° 和 90° 测量得到的宽边与窄边光谱辐射强度的对应结果,其曲线随波长的分布规律与 30° 时的结果相似,在整个 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段上,轴对称喷管 AR0 与正方形喷管 AR1 的光谱辐射强度幅值相近,在 45° 方向上后者大于前者. 但随着矩形喷管宽高比增加,相同波段上的光谱辐射强度幅值逐渐减小,且这种趋势在宽高比大于 8 以后逐渐减弱.

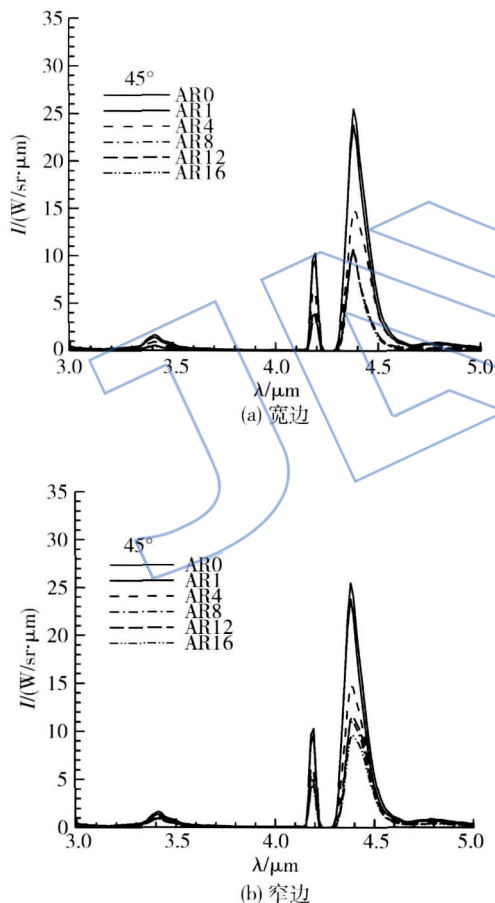


图 9 45° 测量红外辐射分布

Fig. 9 Infrared radiation spectrum of 45° degree

张勃等^[9]研究发现,由于出口旋流的存在,矩形喷管射流的掺混特性好于轴对称喷管,且随着宽高比增加,掺混逐渐增强,使得红外抑制作用逐渐提高.

实验证明在实验研究的 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,大宽

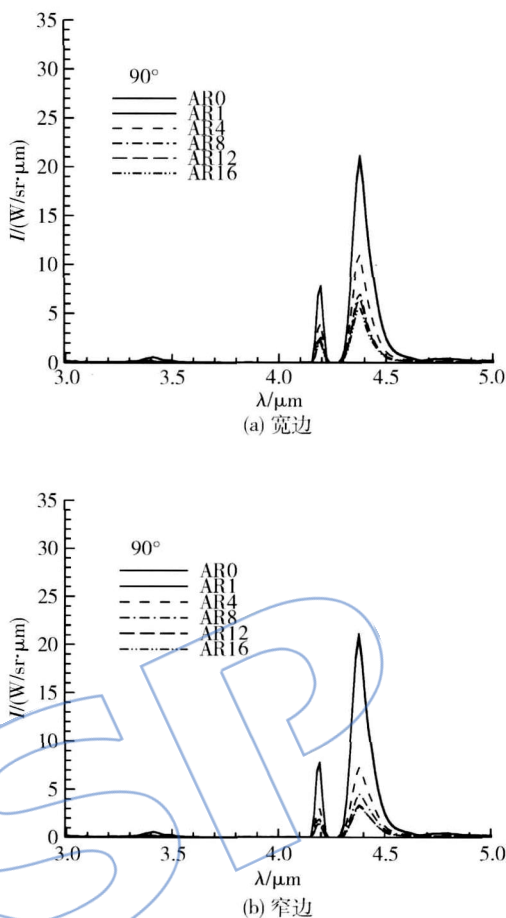


图 10 90° 测量红外辐射分布

Fig. 10 Infrared radiation spectrum of 90° degree

高比矩形喷管具有较强的红外抑制性能,能够有效降低红外辐射信号,而且这种红外抑制能力随着喷管宽高比的增加逐渐提高,在宽高比大于 8 以后,提高趋势有所减弱. 大宽高比矩形喷管具有较强的红外抑制性能,将大大增加飞机的生存力.

4 结 论

(1) 矩形喷管光谱特性与轴对称喷管相似,在不同的波段内均表现出明显的光谱特性,这主要是由于喷管内固体壁面的辐射、燃气内部各种气体成分的辐射与吸收,和大气的吸收共同作用的结果.

(2) 燃气中水蒸气和碳氢化合物气体的吸收-发射,以及大气中水蒸气在对应波段上的吸收使得不同宽高比的矩形喷管光谱辐射强度的最大值都出现在 $4.16\sim 4.26\text{ }\mu\text{m}$ 波段内,并且在 $3.4\text{ }\mu\text{m}$ 附近出现小峰值. 矩形喷管宽边与窄边的光谱辐射强度分布规律相同.

(3) 宽高比为 1 的正方形喷管的光谱辐射强度值与轴对称喷管相似,有些角度甚至较大,红外

抑制作用不明显。

(4) 大宽高比矩形喷管的红外抑制特性强于轴对称喷管,且随着喷管宽高比的增加逐渐增加,但是当宽高比大于 8 以后这种趋势逐渐减弱。

(5) 由热喷流热像图可知,大宽高比矩形喷管射流尾焰呈羽状分布,增强了与外界大气的掺混,并且随着宽高比增大而增强,使高温区进一步缩短,红外抑制特性增强。

参考文献:

- [1] Dusa D J , Speir D W , Rowe R K. Advanced technology exhaust nozzle development[R]. AIAA 83-1286 ,1983.
- [2] 理查森 D. 现代隐身飞机[M]. 魏志祥,顾维征,李景忠,等译. 北京:科学出版社,1991.
- Richardson D. Modern stealth airplane[M]. Translated by WEI zhixiong , GD Weilun , LI Jingzhong , et al. Beijing : Science Press ,1991.
- [3] 山骥骥,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,1995,26(6):791-796.
- SHAN Qiji ,BO Man. The experimental study on the infrared radiation characteristics of hot jet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,1995,26(6):791-796.
- [4] 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.
- ZHEN Libao. Infrared emissions from turbojet with two dimensional nozzle [J]. Acta Aeronautic et Astronautic Sinica ,2002,23(2):140-142.
- [5] Conway W R. Apparatus for suppressing infrared radiation emitted from gas turbine engines[P]. United States Patent ,No. 4800715 ,1989.
- [6] 罗明东,吉洪湖,黄伟,等. 无加力涡扇发动机二元喷管的红外辐射特征实验研究[J]. 航空动力学报,2006,21(4):631-636.
- LUO Mingdong ,JI Honghu ,HUANG Wei ,et al. An experimental investigation on infrared radiation characteristics of 2-D nozzles of turbofan engine without afterburning [J]. Journal of Aerospace Power ,2006,21(4):631-636.
- [7] Ludwig C B ,Malkmus W ,Reardon J E ,et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA-SP-3080,1973.
- [8] Marran D ,Kenny P ,Markham J ,et al. The application of FT-IR spectroscopy to turbine engine exhaust measurement[R]. AIAA-2000-2211.
- [9] 张勃,吉洪湖. 大宽高比矩形喷管的射流与外流的掺混特性的数值研究[J]. 航空动力学报,2005,20(1):104-110.
- ZHANG Bo ,JI Honghu. Numerical investigation of mixing characteristics of jets from rectangular nozzles with large aspect ratio[J]. Journal of Aerospace Power ,2005,20(1):104-110.