

文章编号: 1000-8055(2007)12-1994-06

尾向可见明火大宽高比混合 排气喷管红外抑制特性试验

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

摘 要: 对 5 组不同宽高比($W/H=1\sim 16$)的圆转矩形收敛喷管模型(AR1~AR16)在尾向可见明火时的红外辐射特性进行了试验研究,并与等出口面积的轴对称喷管(AR0)进行了比较,喷管模型为某型实际喷管缩比 4.3 倍得到的。研究发现,与轴对称喷管相比,大宽高比矩形喷管减小了红外源的辐射特征,起到了明显的红外抑制作用。在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,所研究的喷管在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段上的红外辐射信号呈现随探测角度增大逐渐减小的规律。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 红外抑制; 矩形喷管; 大宽高比; 航空发动机
中图分类号: V231.1; O343.3 **文献标识码:** A

Experimental investigation of infrared suppressing characteristics of rectangular nozzles with large aspect ratio

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

Abstract: The infrared suppressing characteristics of five rectangular convergent nozzles with different aspect ratios were investigated experimentally. The aspect ratio of the rectangular nozzles is 1, 4, 8, 12, and 16, named AR1~AR16 respectively, while the axisymmetric nozzle is named AR0. The results indicate that infrared radiation from rectangular nozzle decreases with the increase of detection angle, and the magnitude of infrared radiation is smaller than axisymmetric one, and would accelerate with the rise of aspect ratio.

Key words: aerospace propulsion system; infrared suppressing; circle to rectangular cross-sections; large aspect ratio; aeroengine

现代战争中,处于第二个大气窗口($3\sim 5\ \mu\text{m}$)的红外辐射日益成为敌方红外制导武器追踪攻击的重要波段之一,航空发动机的尾喷流与发动机热部件是飞机上相应波段的主要红外辐射源,其强度大小直接影响到飞机被敌方探测到的可能性。研究表明,矩形喷管的红外辐射特征大大低于传统的轴对称喷管^[1],加上其优越的气动性能,使得矩形喷管成为提高战斗机的隐身性、机动性的一条重要的技术途径。

大宽高比矩形喷管具有良好的红外抑制特性^[2],南航郑礼宝^[3]研究了宽高比为 2.25 的矩形喷管的红外辐射特性,发现二元喷管能够有效降低航空发动机的红外辐射强度。罗明东等^[4]实验研究了在尾向不见明火状态下,大宽高比矩形喷管的红外辐射特性,得到宽高比为 8 时红外抑制效果较好的结论。

张勃等^[5]通过数值模拟得到了随着矩形喷管宽高比增加,射流掺混逐渐增强,从而减小尾喷流

收稿日期: 2007-04-24; 修订日期: 2007-09-21

作者简介: 张勃(1976-),男,江苏南京人,讲师,沈阳 606 所在职博士后,主要研究方向:红外隐身,强化换热。

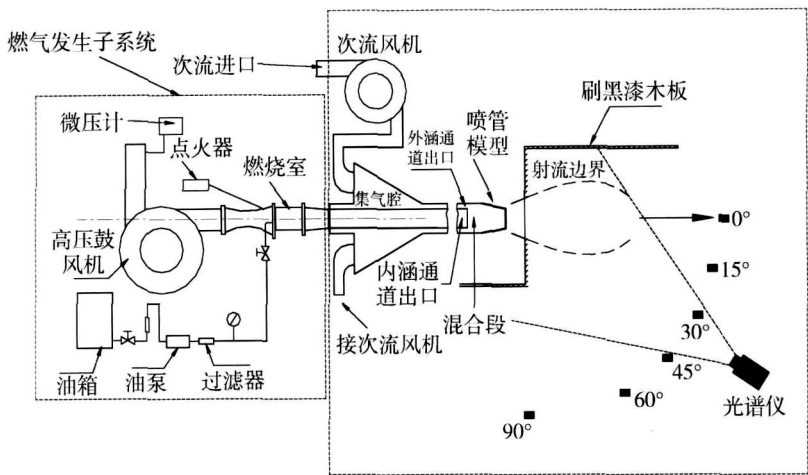


图 1 喷管热射流试验台

Fig. 1 Rig of hot jets experiment

红外辐射的结论,从气动角度对其红外抑制特性的变化给出了解释。

本文采用国外某型先进无人机上采用的发动机喷管的缩比模型,针对尾部可见明火状态,在地面状态下,研究了宽高比在 1~16 之间的 5 组等出口面积矩形喷管的红外抑制特性,探测角度在 0°~90°,研究波段为第二个大气窗口(3~5 μm),发现矩形喷管的红外辐射在这个波段上具有明显的方向性,其量值随测量角度的增大逐渐减小,大宽高比矩形喷管的红外抑制特性较强。

1 试验设备

本试验台模拟涡扇发机构造建立,主要包括混合排气收敛喷管、内外涵通道、燃烧室以及相应的温度控制系统,具体如图 1 所示。内外涵通道同轴布置,其气流分别由两台风机提供,内外涵通道直径分别为 160 mm,230 mm,涵道比约为 4,燃烧室为单管燃烧室,为了控制、调节方便,加装了供油系统以及点火系统控制台。试验中内涵进口燃气温度为 910 K,外涵气流进口 290 K,内涵出口气流温度为 650 K,压力为 1.12×10^5 Pa,外涵气流出口为大气压力。采用航空煤油为燃料,试验台具体参数见文献[6]。

2 试验模型与测试仪器

参照国外某型高空无人机上采用的轴对称喷管尺寸,按照几何相似的原则设计得到本文研究的轴对称喷管,然后在保持出口面积相同的前提下,将轴对称喷口改为不同宽高比的矩形喷口。图2中给出宽高比为4的圆转矩形过渡型面的试验件。Wallace^[7]指出,这种型面已经在某型飞机

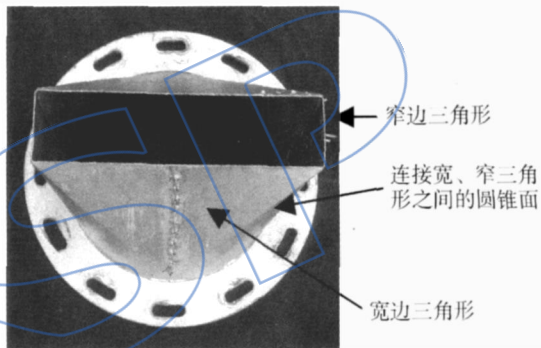


图 2 过渡段型面

Fig. 2 Circle to rectangular shape

上进行过试验,起到了较好的红外抑制作用,而且其制造工艺相对简单,易于实现。

表 1 中列出了本文研究的 6 个收敛喷管模型的几何参数,轴对称模型命名为 AR0,5 个矩形喷

表 1 喷管几何参数表

Table 1 Parameters of nozzles

模型 编号	喷管出口尺寸/ m		宽高比 W/ H	湿边周长/ m C
	H	W		
AR1	0.14	0.14	1	0.56
AR4	0.071	0.284	4	0.71
AR8	0.050	0.4	8	0.9
AR12	0.041	0.491	12	1.06
AR16	0.035	0.567	16	1.2
AR0	$\Phi_1 = 0.23, \Phi_2 = 0.16$			0.50

管模型则根据不同的宽高比分别命名为(AR1~AR16),模型进口面积均为 0.04 m²,出口面积均为 0.02 m²。从表中可以看出,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,射流与环境大气的接触面积继续增大,掺混增强。

矩形喷管不具有轴对称性,试验中对宽边与窄边两个互相垂直对称平面内的红外辐射进行了测量(图3),并且在两个平面内研究了方向角 α ($0^\circ \sim 90^\circ$)对光谱辐射强度的影响,如图4所示。试验中采用亚光漆刷黑的木板对尾喷管外壁面和环境的红外辐射进行遮挡,同时可以减少木板本身对环境和喷管的入射辐射的反射。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。轴对称喷管也仅测量了一个对称面上的辐射强度分布。试验探测距离为20 m,目标视为点源处理,不同角度探测区域范围如图中虚线所示。

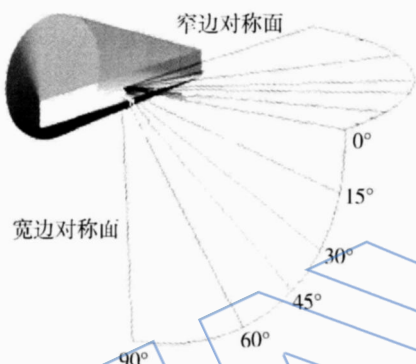


图3 测量平面示意图

Fig.3 Sketch of measuring planes

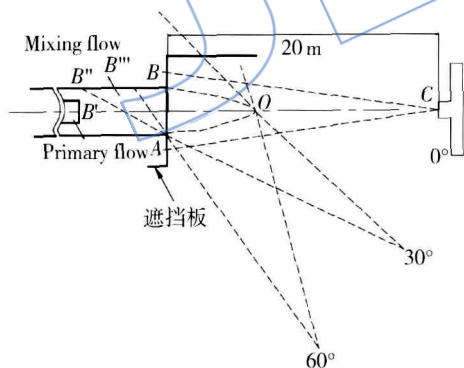


图4 不同角度探测区域示意图

Fig.4 Sketch of detecting region

为了保证大气透过率参数基本一致,本文的试验工作都是在相近的天气状况(晴天、傍晚、无风)条件下进行。为避免仪器误差,试验过程中使用标准黑体对仪器进行校验,数据处理方法同文献[6]。

3 试验结果与分析

3.1 光谱强度随测量角度的变化

矩形喷管的红外辐射特性随着探测角度的变

化而变化,具有一定的方向性特点。图5给出了轴对称喷管AR0在不同探测角度($0^\circ \sim 90^\circ$)时得到的光谱强度 $I/(\text{W}/\text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 的变化情况。

从0°测量结果可以看出,3~5 μm 波段范围内,AR0喷管的红外光谱辐射强度在 $\lambda = 4.16 \mu\text{m}$ 和 $4.55 \mu\text{m}$ 两个波段处存在两个辐射峰值,最大值达到 $31.5 \text{ W}/\text{sr} \cdot \mu\text{m}$ ($4.55 \mu\text{m}$)。当测量角度偏离喷口中心,光谱强度曲线分布发生了变化。测量角度为 15° 时,在整个3~5 μm 波段范围内,光谱强度值相比 0° 的结果明显减小,光谱曲线依然存在两个峰值,但峰值对应的波段变为 $\lambda = 4.16 \mu\text{m}$ 和 $4.4 \mu\text{m}$,第二个峰值波段有一定变化。其原因可以从图4中所示结构分析得到,探测器在喷管正后方(0°)测量时,探测到的红外辐射能量包括尾喷流、火焰辐射以及不完全燃烧产物的辐射,角度增大后,所探测到的主要是尾喷流辐射,其他成分的贡献相对减小,而不同物质发射与吸收光谱是不同的,加之不同物质的温度不尽相同,也会导致其光谱发生变化,众多因素综合起来,使得总的辐射峰值波段发生偏移。测量角度进一步增大,辐射强度曲线随波长变化趋势与 15° 时相同,只是强度值进一步减弱。罗明东等^[4]在尾部不见明火状态下,内涵中心温度为 773 K 时得到的峰值波段分别为 $4.18 \mu\text{m}$ 、 $4.37 \mu\text{m}$,与本文结果略有区别,这是由于试验状态以及喷管结构

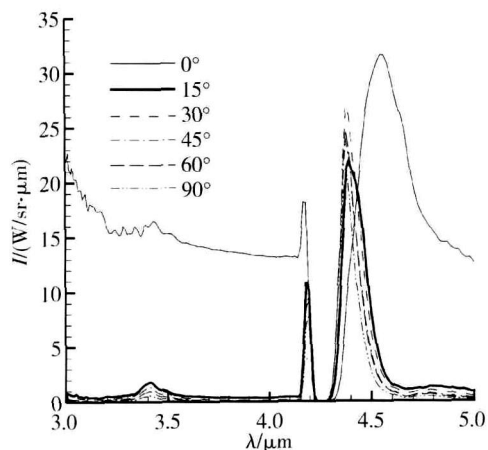


图5 AR0对称面上红外光谱分布

Fig.5 Radiation spectrum in symmetrical plane of AR0

不同(是否装有中心锥)对燃烧室与喷管内的高温部件遮挡作用不同引起的,但是其光谱分布形式与本文是吻合的,说明在有无加力状态下,喷管红外光谱分布是类似的。图6中给出了AR1在不同角度时的光谱强度曲线,其强度随波长的变化规律与AR0相同。

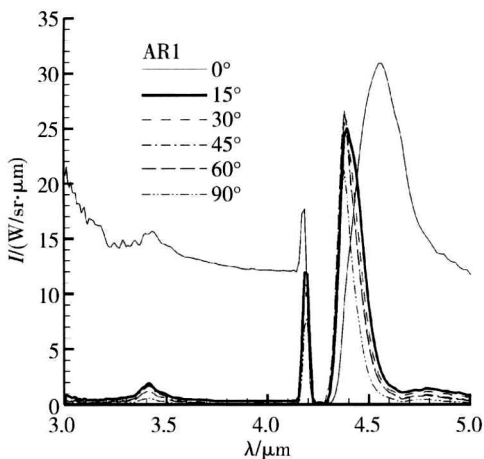
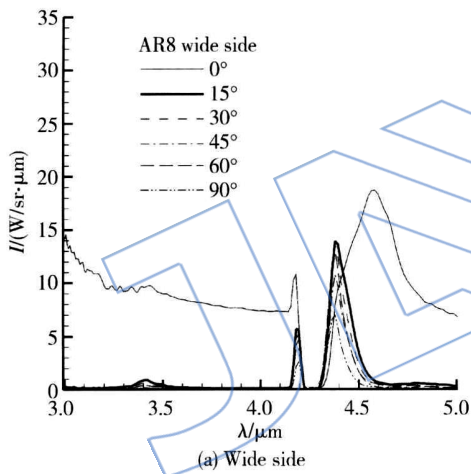


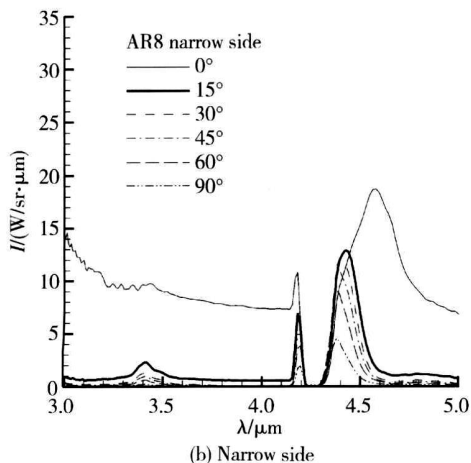
图 6 AR1 对称面上红外光谱分布

Fig. 6 Radiation spectrum in symmetrical plane of AR1

图 7(a), (b) 分别给出了 AR8 模型宽对称面与窄对称面探测得到的光谱强度分布. 其随波长变化的规律与 AR1 相同, 说明不同喷管形状对光谱辐射强度随波长的分布规律影响很小.



(a) Wide side



(b) Narrow side

图 7 AR8 对称面上红外光谱分布

Fig. 7 Radiation spectrum in symmetrical planes of AR8

对不同喷管研究均发现, 0 时测量得到的强

度值明显高于其他角度的测量值, 这是由于在喷管正后方探测时, 探测器直接探测到喷管内部火焰, 燃烧室中的高温金属部件以及喷管高温内壁发射的红外辐射信号导致的. 如图 5 所示, 0 时测量探头直接探测到 BB 区域, 其中包括燃烧室出口的高温整流孔板, 测量角度增大至 30 时, 高温整流孔板不在探测范围内了. 探测器能够探测到的高温内壁的范围也减小到 BB'', 角度继续增大, 则高温内壁面积随之逐渐减小到 BB''', 这使得光谱强度逐渐减小.

由于喷管内壁面面积大小不仅代表了高温内壁本身发射与吸收的大小, 也会影响壁面二次反射的大小. 在喷管壁面发射的红外信号中, 壁面二次反射的能量值较大, 而二次反射的大小又与壁面面积有很大关系. 探测角度增大使得探测得到的喷管内壁面积减小, 导致二次反射能量减小, 从而一定程度上导致了光谱辐射强度的减小.

从以上对喷管不同角度探测结果的分析可以看出, 矩形喷管的光谱辐射强度具有明显的方向性, 随着测量角度的增大, 相应波段上的光谱强度值逐渐减小.

3.2 红外辐射强度随测量角度的变化

为了比较矩形喷管与轴对称喷管红外辐射信号的总体效果, 文中对光谱辐射强度在所研究的波段上按点源处理方法 $I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda$ 进行积分, 式中, I 为红外辐射强度, I_{λ} 为光谱辐射强度, λ_1, λ_2 为本文研究波段的下限与上限, 分别为 3 μm 和 5 μm .

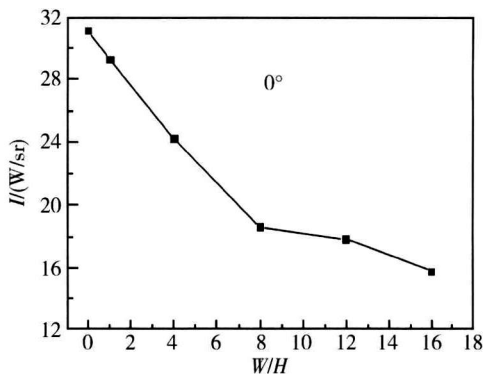


图 8 测量角度为 0 时的红外辐射强度分布

Fig. 8 Infrared intensity of 0° of different nozzle

图 8 中给出了不同喷管在喷管正后方, 即测量角度为 0 时的红外辐射强度分布, 这个角度 (飞机正后方) 是战机最为关心, 也是威胁最大的方向. 可以看出, 矩形喷管的红外辐射强度明显小

于轴对称喷管,而且随着宽高比的增大,矩形喷管的红外辐射强度逐渐降低.其中,宽高比为8的喷管的红外辐射强度降低到轴对称喷管的60%以下,但是当喷管宽高比大于8以后,降低幅度有所减小.

图9(a)中给出了各个喷管宽对称面方向上红外辐射强度随测量角度的变化情况.以AR0为例,结合图8中0°时的试验结果,可知辐射强度在0°~90°范围内是逐渐下降的(为了突出15°~90°,图9中未给出0°的结果),这与前文的分析是吻合的,随着测量角度的增大,红外辐射强度逐渐减小.AR1随角度的变化规律与AR0相同.

模型AR4的红外辐射强度在0°~90°范围内,随角度的变化规律与AR1相同,随角度增大逐渐减小,与罗明东^[4]中无加力条件下得到的梨形分布结果相似.AR8~AR16宽对称面方向上的红外辐射信号随角度的变化与AR4相同,但是相同角度下,其值随着宽高比增大是逐渐减小的,宽高比增大至8时,各个角度上的红外辐射值都降低到1.25 W/sr以内,均比AR0相应角度上的红外辐射降低了50%以上,当宽高比增大至12,16时,红外辐射强度信号则和AR8的强度值接近,随宽高比增大而减小的趋势减小.

图9(b)给出了窄对称面方向探测时各个喷管在不同角度下的红外辐射强度分布,轴对称喷管与正方形喷管没有宽窄对称面的区别.矩形喷管宽高比增大后,窄对称面方向的红外辐射强度在0°~90°范围内随着宽高比增大均是逐渐降低的.

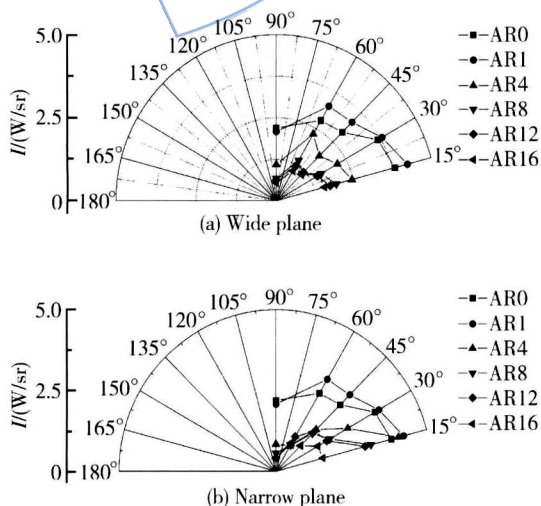


图9 红外辐射强度随探测角度变化

Fig.9 Infrared intensity of different detecting angles

研究得到,在一定范围内($1 \leq W/H \leq 8$)提高宽高比,能够明显降低矩形喷管的红外辐射信号,

而继续增大宽高比则红外抑制效果提高不明显,与张勃等^[6]中研究得到宽高比大于8以后,射流掺混效果增强不明显结论吻合.

3.3 90°宽、窄对称面方向上红外辐射强度变化

战斗机在飞行中,当从前向和侧向垂直方向探测时,探测器能探测到的红外辐射主要来自尾喷流的辐射,而喷管及其内部的高温部件的红外辐射不在探测范围内.

为了减小前向和侧向的威胁,本节单独对尾喷流辐射进行研究.图10将6组喷管不同对称面方向探测得到的尾喷流测量结果单独列出.可以看出从宽、窄面探测时,矩形喷管对尾喷流的红外抑制作用均随宽高比增大逐渐增强.这主要得益于大宽高比矩形喷管能够增强掺混,降低尾喷流温度.在试验研究的宽高比范围内,尾喷流窄边探测的红外辐射均小于对应的宽对称面.试验中,宽、窄对称面温度相等,目标红外辐射强度的区别是由于辐射源面积的不同导致的.

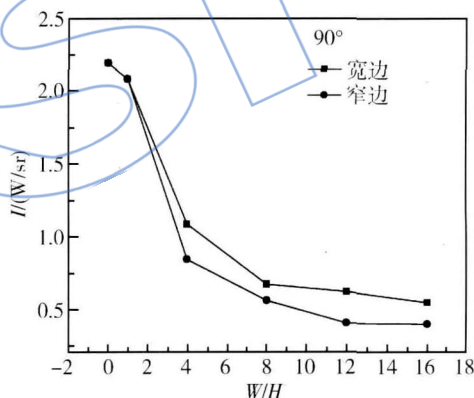


图10 不同喷管尾喷流宽、窄边对称面上红外辐射强度

Fig.10 Infrared radiation intensity of symmetrical planes of different nozzles

4 结 论

本文研究了尾部可见明火状态下,轴对称喷管以及等出口面积的矩形喷管的红外辐射强度随探测角度的变化规律,得到如下结论:

(1) 方喷管相对轴对称喷管在0°和90°方向上相比轴对称喷管具有一定的红外抑制作用,但是在其余角度上没有起到抑制作用;

(2) 在包含热部件时,不同模型宽边与窄边探测得到的红外辐射结果没有发现一致的规律,但是尾喷流红外辐射(90°方向探测)窄对称面侧均小于宽对称面侧,说明减小辐射源面积可以起到红外抑制的目的;

(3) 宽高比大于 1 的矩形喷管具有一定的红外抑制作用,随着宽高比增大,抑制作用增强,宽高比为 8 时,喷管各个角度的红外辐射相比轴对称喷管均降低 40 %以上,再增大宽高比红外抑制作用增大不明显。

参考文献:

[1] Dusa D J , Speir D W , Rowe R K. Advanced technology exhaust nozzle development[R]. AIAA 83-1286.

[2] 理查森 D. 现代隐身飞机[M]. 北京:科学出版社,1991.

[3] 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 emission from turbojet with two-dimensional nozzle[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica, 2002,23(2):140-142.

[4] 罗明东,吉洪湖,黄伟,等. 涡扇发动机二元喷管的红外光谱辐射特性的实验研究[J]. 推进技术,2007,28(2):152-156.

LUO Mingdong,JI Honghu, HUANG Wei, et al. Experi-

ment on spectral infrared radiation characteristics of exhaust jet from 2D nozzle of turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007,28(2):152-156.

[5] 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,2004,19(2):104-110.

ZHANG Bo,JI Honghu. Numerical study of internal and external flow mixing for rectangular nozzles with large aspect ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2004,19(2):104-110.

[6] 张勃,吉洪湖,罗明东,等. 宽高比对尾向可见明火矩形喷管红外抑制特性影响研究[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1820-1825.

ZHANG Bo,JI Honghu, LUO Mingdong, et al. Investigation of the effect of aspect ratio to infrared suppressing characteristics of rectangular nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2007,22(11):1820-1825.

[7] Wallace R C. Apparatus for suppressing infrared radiation emitted from gas turbine engines[P]. United States Patent, No. 4800715.