涡扇发动机二元喷管的红外光谱辐射特性实验*

罗明东, 吉洪湖, 黄 伟, 蔡 旭, 高 潮

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为了获得涡扇发动机二元喷管的红外光谱辐射特性, 分别测量了喷口面积相等而宽高比分别为 1, 4, 8, 12和 16的二元喷管在 3~ 5 μm波段的红外光谱辐射特性, 并与轴对称喷管进行了对比。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。结果表明, 采用宽高比大于或等于 4的二元喷管在绝大部分探测方向能够有效降低喷管的红外光谱辐射强度, 但是在宽高比大于 8以后二元喷管的红外光谱辐射强度不再随宽高比的增加而明显降低。

关键词: 涡轮风扇发动机; 二元喷管+; 红外光谱辐射

中图分类号: V231.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-4055 (2007) 04-0394-05

Experiment on spectral infrared radiant characteristics of two-dimensional nozzles of turbofan engine

LUO Ming-dong, JI Hong-hu, HUANG Wei, CAI Xu, GAO Chao

(Inst. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract The spectral infrared radiant intensities of 2D nozzles of turbofan engine are measured. The aspect ratio of the 2D nozzles are 1, 4, 8, 12 and 16, respectively. The measured spectral radiant intensities in the wave band of 3~ 5 μm are presented and compared with that of axisymmetric nozzle with the same exit area. The flow inside the nozzle is composed of combustion gas stream in main channel and air stream in the secondary channel to simulate nozzles of turbofan engine. The results show that the 2D nozzle, with aspect ratio greater than four or equal to four can dramatically suppress infrared radiant of the nozzle in most orientation of detection. Its suppression effect increases with the increase of the aspect ratio. While further increasing aspect ratio after it is greater than 8 will no longer lead to obvious reducing of infrared spectral radiant intensity.

Key words Turbofan engine; 2-D nozzle+; Spectral infrared radiant

1 引 言

飞机发动机喷管固壁和燃气流的红外辐射是红外制导武器的主要探测和攻击目标, 降低喷管红外辐射的一个有效方法是在涡扇发动机上采用二元喷管。二元喷管的红外辐射抑制原理是利用喷管内部圆转方过渡段的三维效应增强涡扇发动机内外涵气流的掺混, 利用喷口湿边周长的增加来增强尾喷流和外界空气的掺混, 利用喷管外形来降低尾喷管内部中心锥、涡轮叶片、内涵通道壁面等高温区在探测方向上的投影面积。Chu等计算研究了涡喷发动机二元喷管的热喷流的温度分布[1], Dechor等简单估算了涡扇发动机二元喷管的热喷流的红外辐射强度分布[2], 翟普等、山其骧等和郑礼宝等分别实验研究了涡喷发动机二元喷管的红外辐射强度和红外光谱辐射强度[3~5], 张勃 运用模型实验研究了涡扇发动机在加力状态下 (尾向可见明火)二元喷管的红外光谱辐射强度[6], 罗明东等运用模型实验研究了非加力涡扇发动机二元喷管的热喷流的红外光谱辐射特性及非加力涡扇发动机二元喷管的辐射强度的空间分布[7,8], 对于非加力状态下涡扇发动机二元喷管的红外光谱辐射特性的研究国内尚未开展, 同时这一方面的研究在国外的文献资料中也不多见。

由于发动机运行的工况复杂, 直接利用真实发动

* 收稿日期: 2006-10-25; 修订日期: 2007-03-23。

作者简介: 罗明东 (1977—), 男, 博士生, 研究领域为飞行器红外隐身技术研究。E-mail: mingdonglu@163.com

机开展二元喷管红外光谱辐射特性的研究无论在成本上,还是时间上都需要付出很大的代价,因此,本文采用模拟实验的方法进行了研究。研究了非加力状态下(尾向不可见明火),探测方向和喷口宽高比的变化对涡扇发动机二元喷管的红外光谱辐射特性的影响。在相近的天气状况(晴天、傍晚、无风)、相同的喷管和燃气温度及相同的测量距离(15 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,得出了各个喷管在不同探测方向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。

2 实验介绍

2.1 实验装置

本文的实验装置如图 1和图 2所示,图 1是实验装置的照片,图 2是实验装置喷管段的平面图,从图中可以看出它由热喷流实验台、喷管模型和刷黑的背景屏蔽木板组成。

热喷流实验台包括内涵燃气系统、外涵空气系统和带有中心锥的混合段。内涵燃气系统包括气源、燃烧室和内涵通道;外涵空气系统包括气源、集气腔和外涵通道。在实验时,内涵中心燃气温度维持在 500 ℃,外涵气流温度为环境温度,外涵通道与内涵通道的流量比维持在 3左右。

喷管模型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为原型进行设计,首先将其缩小得到了轴对称喷管模型 AR0,它的进口直径为 230 mm,出口直径为 158 mm,长度为 145 mm;然后依照进、出口面积和长度相等的原则,分别设计了宽高比为 1,4,8,12和 16的圆转矩形喷管,并根据它们的宽高比分别编号为 AR1,AR4,AR8,AR12和 AR16。二元喷管的圆转矩形的过渡段采用易于加工的三角形与圆锥面结合的形式。

背景屏蔽木板采用亚光漆刷黑,放置在喷口周围与仪器探测方向相对的位置上,如图 1所示。这样做不仅可以屏蔽掉尾喷管外壁面和环境的红外辐射得到比较光滑的背景曲线,而且可以减少木板本身对环境和喷管的入射辐射的反射。

2.2 测量仪器和实验方法

本文采用傅立叶变换红外(FTIR)光谱仪测量二元喷管的光谱辐射,该仪器用内置的锑化铟(InSb)探测器测量 3~5 μm 波段的红外光谱辐射,在工作过程中探测器采用液氮制冷,测量前必须用黑体进行标定。具体的测量步骤及数据处理可以参考文献[7]。

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 3所示。本文把 α= 0°的方向规定为正对喷管轴线的方向,α= 90°的方向是与喷管轴线垂直的方向。因为二元喷管几何形式上的非轴对称性,实验中对两个互相正交对称的平面内的红外辐射进行了测量,一个对称面为宽边探测面,而另一个为窄边探测面,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 3所示。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光谱辐射强度分布。对轴对称喷管也仅测量了一个对称面上的辐射强度分布。

为了使得各个喷管在不同方向上测量得到的结果具有可比性,在所有测量过程中除了必须保证热喷流实验台的内、外涵出口气流的温度和压力参数基本不变外,还必须保证大气光谱透过率参数基本一致。为了保证大气透过率参数基本一致,本文的实验工作都是在相近的天气状况(晴天、傍晚、无风)、相同的测量距离(15 m)下进行的。

Fig. 1　Photo of experiment equipment

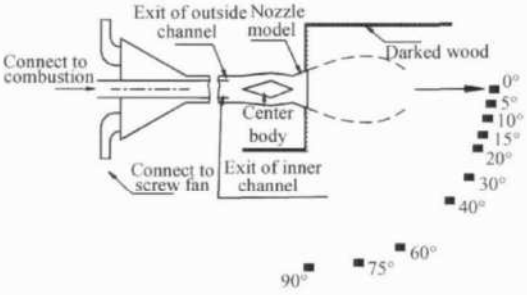


Fig. 2　Sketch map of experiment system

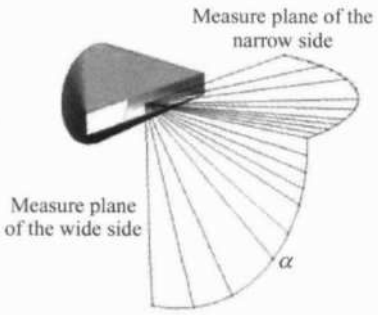


Fig. 3　Setting of detect orientations in the experiment

3 二元喷管的红外光谱辐射强度随探测方向的变化

图 4为本文测量得到的 AR0喷管在几个典型探测方向上的光谱辐射强度分布图, 图中 α= 90°方向的测量结果就是文献 [7]中热喷流的光谱辐射强度。

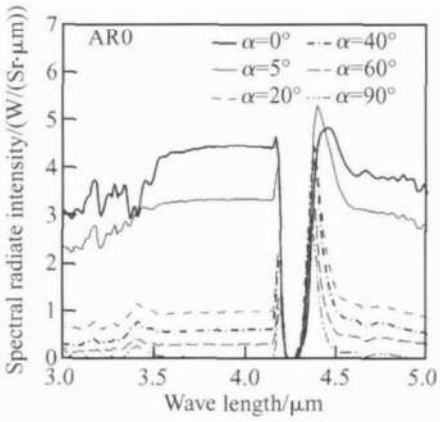


Fig 4 IR spectral radiant intensity of AR0 nozzle

从图中可以看出 AR0喷管的光谱辐射强度除了在 4.37 μm附近随着 α的增大先升高后下降以外, 都是随着 α的增大而不断下降的。同时可以观察到, 在各个探测方向上的辐射强度都具有明显的光谱特性:

(1)在 3.0~ 3.6 μm波段光谱辐射强度曲线出现一些明显的波动, 并且这些波动在 α= 0°方向附近表现为对喷管固壁的红外辐射的吸收, 而在 α= 90°方向附近则表现为对喷管固壁的红外辐射的增强, 同时在 α≥ 20°的范围内出现了明显的波峰。这些现象的产生归结于三个原因: 大气中 H_2O 的吸收、燃气中 H_2O 和碳氢化合物气体的吸收-发射、碳氢化合物气体在 3.4 μm附近吸收-发射最强[9, 10]。在固体壁面辐射很强的探测方向 (α= 0°方向及附近)这些因素的综合效果表现为明显的吸收作用, 而在固体壁面辐射不是很强或者很微弱的探测方向则表现为吸收与增强并存的效果。

(2)在 3.6~ 4.12 μm波段光谱辐射强度曲线大致为一条水平直线, 仅仅有一些微弱的波动, 并且在 α= 90°方向其数值趋近于 0, 这是由于在该波段大气的吸收很微弱[5], 并且燃气中仅仅有 H_2O 和部分未完全燃烧的固、液体颗粒参与辐射换热, 并且这些介质在该波段的吸收系数很低, 因此在该波段喷管的光谱辐射特性主要由固体壁面的红外辐射决定的。

(3)在 4.12~ 4.6 μm波段, 光谱辐射强度分布出现两个明显的波峰和一个位于 4.26 μm附近的波谷, 波峰分别位于 4.18 μm和 4.37 μm附近。该现象是由于在该波段燃气中的 CO_2具有强烈的吸收-发射作用[11]和大气在 4.26 μm附近的光谱透过率接近零[7]这两个原因引起。

(4)在 4.6~ 5.0 μm波段光谱辐射强度曲线虽然有一些波动, 但是总体表现为随波长增加而下降的趋势, 在这个波段中大气的吸收很微弱[7], 并且燃气中主要有 H_2O 和 CO参与辐射换热, 在固体壁面辐射存在的探测方向 (0°≤ α< 90°)这些因素的影响仅仅表现为光谱辐射强度的很小的波动, 但是在 α= 90°方向附近则表现为对喷管红外辐射的增强。

图 5为 AR1喷管在几个典型的探测方向上的光谱辐射强度分布。从图中可以看出 AR1喷管的光谱辐射强度的分布规律以及随探测方向变化的规律都与 AR0喷管相似, 只是在光谱辐射强度的具体数值上有一定的差别。

图 6为 AR4喷管在几个典型的探测方向上的光谱辐射强度分布图, 其中图 6(a)是宽边探测平面内的结果, 图 6(b)为窄边探测平面内的结果。从图 6

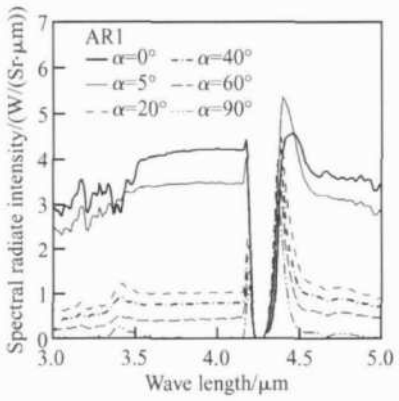
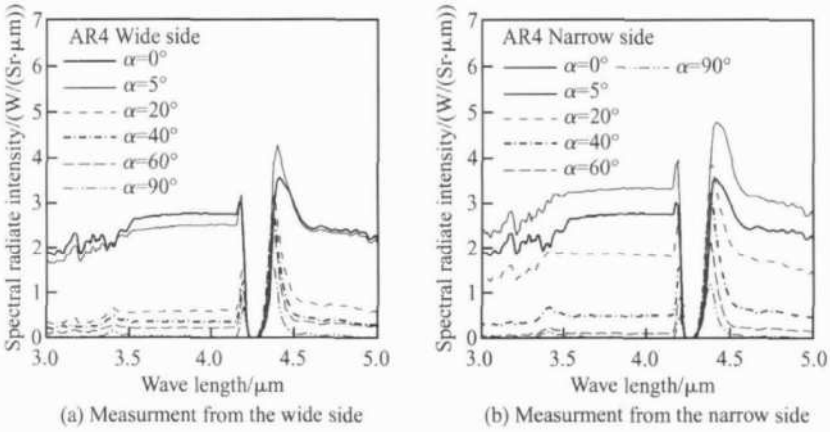


Fig. 5 IR spectral radiant intensity of AR1 nozzle



(a) Measurment from the wide side (b) Measurment from the narrow side

Fig. 6 IR spectral radiant intensity of AR4 nozzle

(a)可以看出, AR4喷管在宽边探测平面内的光谱辐射强度的分布规律以及随探测方向变化的规律都与AR1喷管相似, 只是在光谱辐射强度的具体数值上有所降低。从图 6(b)可以看出, 在窄边探测平面内的光谱辐射强度随波长的变化规律与宽边探测面一致的, 但是在 α= 5°方向的光谱辐射强度在各个波段都高于 α= 0°方向。综合图 6(a)和图 6(b)可以看出: (1)在 α= 5°范围内, 窄边探测面内的辐射强度大于宽边探测面; (2)在 α= 90°方向附近, 宽边探测面内的光谱辐射强度除了在 4.12~ 4.6 μm波段明显大于窄边探测面外, 在其它波段光谱辐射强度都较小。

喷管 AR8, AR12和 AR16的红外光谱辐射强度随波长和探测方向的变化与 AR4喷管相似, 只是光谱辐射强度随喷口宽高比增加而有所变化, 详见下一节。

4　二元喷管的红外光谱辐射强度随喷口宽高比的变化

图 7~ 11为实验测到的 AR0~ AR16喷管在几个典型的探测方向上的光谱辐射强度分布的比较。从图 7可以看出, 在 α= 0°方向上二元喷管的光谱辐射强度都小于轴对称喷管 AR0, 并且随宽高比的增加而降低, 但在宽高比大于 8以后光谱辐射强度随宽高比的增加而降低的趋势明显减缓。

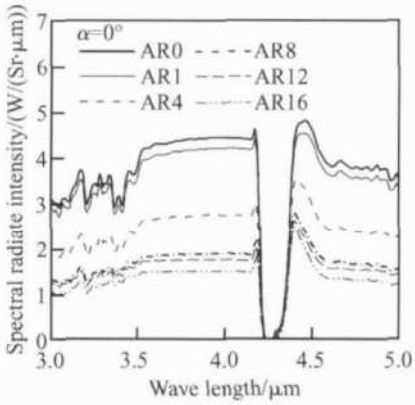
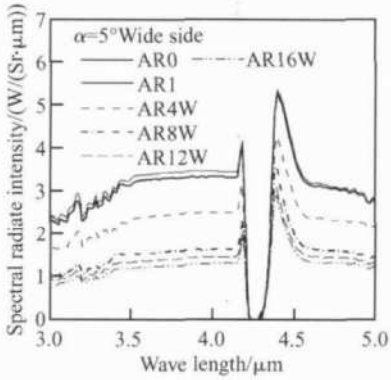
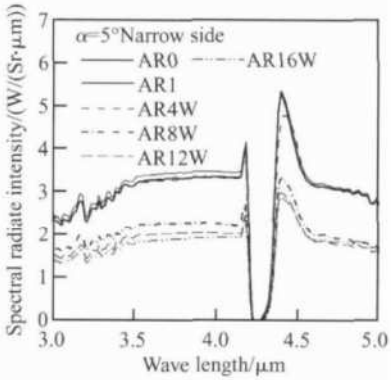


Fig. 7　IR spectral radiant intensity of each nozzle on the orientation of 0°

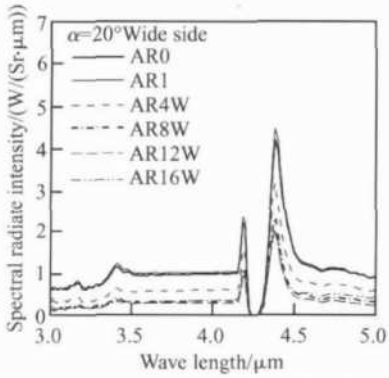


(a) Measurment from the wide side

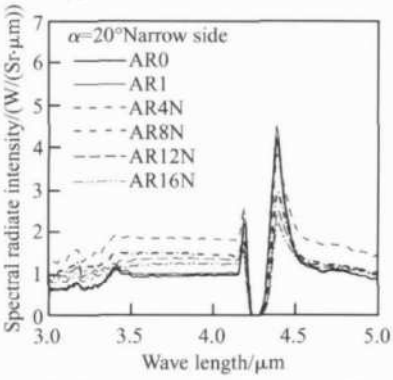


(b) Measurment from the narrow side

Fig. 8　IR spectral radiant intensity of each nozzle on the orientation of 5°

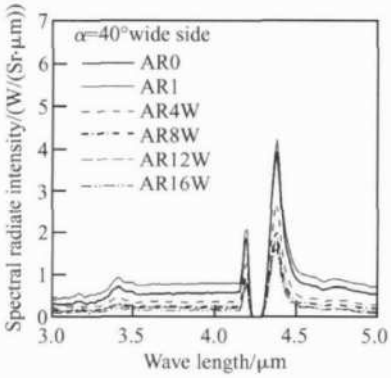


(a) Measurment from the wide side

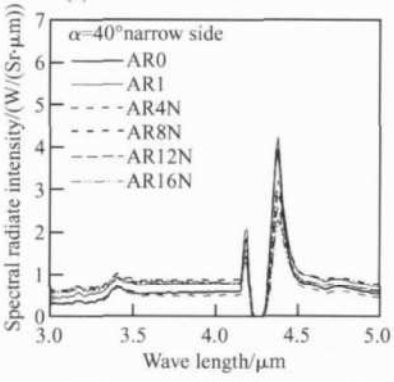


(b) Measurment from the narrow side

Fig. 9　IR spectral radiant intensity of each nozzle on the orientation of 20°

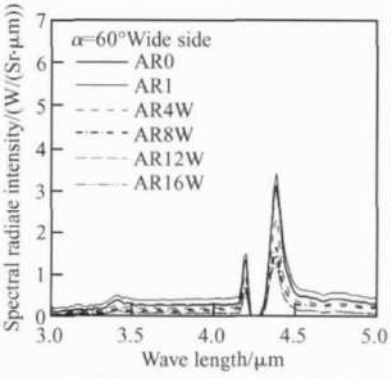


(a) Measurment from the wide side



(b) Measurment from the narrow side

Fig. 10　IR spectral radiant intensity of each nozzle on the orientation of 40°



(a) Measurment from the wide side

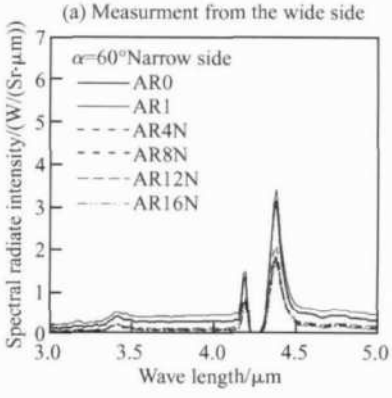


Fig. 11　IR spectral radiant intensity of each nozzle on the orientation of 60°

在 α= 5°方向上,见图 8,AR1喷管的光谱辐射强度在 3~ 5 μm 波段的大部分区域内都大于 AR0喷管。对于宽高比大于或等于 4的二元喷管,无论宽边探测面内还是窄边探测面内,光谱辐射强度都小于 AR0和 AR1喷管,并且随着宽高比的增加而降低。同样在宽高比大于 8以后二元喷管的光谱辐射强度随宽高比增加而降低的趋势明显下降。

从图 9和图 10可以看出,在 α= 20°和 40°方向上喷口宽高比对宽边探测平面内和窄边探测平面内的光谱辐射强度的影响各不相同。在宽边探测平面内,喷口宽高比的变化对喷管的光谱辐射强度的影响与 α= 0°方向是一致的。在窄边探测平面内则有很大的不同,主要表现在宽高比大于或等于 4的二元喷管在以固体壁面辐射为主的 3.0~ 4.12 μm 和 4.6~ 5.0 μm 波段内的光谱辐射强度都明显大于 AR0喷管和 AR1喷管,但是在燃气辐射为主 4.12~ 4.6 μm 波段低于轴对称喷管。

从图 11可以看出,二元喷管在 α= 60°方向上的光谱辐射强度随喷口宽高比而变化的规律与 α= 5°方向是一致的,只是辐射强度进一步降低。

5 结 论

本文在双涵道热喷流实验台上利用傅立叶变换红外光谱仪测量了非加力涡扇轴对称喷管和宽高比为 1, 4, 8, 12和 16的二元喷管在对称面上的光谱辐射强度分布,得到以下结论:

(1)正方形喷管的光谱辐射强度分布规律和轴对称喷管相同,并且数值接近,不具有红外抑制效果。

(2)宽高比大于或等于 4的二元喷管在各个探测面内的光谱辐射强度分布规律明显不同,同时,在 α等于 90°方向附近宽边探测面内的光谱辐射强度大于窄边探测面,而在其它范围内小于窄边探测面。

(3)宽高比大于或等于 4的二元喷管的光谱辐射强度在宽边探测面内各个方向以及窄边探测面内 α等于 0°, 5°, 60°和 90°方向都明显低于轴对称喷管,并且随宽高比的增加进一步降低,但是这种趋势在宽高比大于 8以后明显减弱。

(4)在窄边探测面内 α等于 20°或者 40°方向,宽高比大于或等于 4的二元喷管的光谱辐射强度在固体壁面辐射为主的波段 (3.0~ 4.12 μm、4.6~ 5.0 μm)高于轴对称喷管,但是在燃气辐射为主的波段 (4.12~ 4.6 μm)低于轴对称喷管;

(5)采用大宽高比二元喷管能够在所有方向降低喷管的光谱辐射强度的峰值,但是可能在部分方向增强以固体壁面辐射为主的波段的光谱辐射强度,因此,为了在所有方向上降低喷管在各个波段的光谱辐射强度,必须将二元喷管技术和其它喷管红外抑制技术综合应用。

参考文献:

[1] Chu C W, Der J, Wun W. A simple 2D-nozzle plume model for IR analysis[R]. *AIAA* 1980-1808.

[2] Dechor R. Infrared emission from turbofans with high aspect ration nozzles[R]. *AIAA* 1981-4319.

[3] 翟 普,隋俊友,崔 杰,等. 弹用航空发动机尾喷流红外抑制技术研究[J]. 推进技术, 1996, 17(4). (ZHAI Pu, SUI Jun-you, CUI Jie, et al. A reasearch on radiation restriction technique of a nozzle flow of aero-engine for missile[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(4).)

[4] 山其骧,卜 满. 热喷流红外辐射特性的测量实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6): 791~ 796.

[5] 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.

[6] 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]. 南京:南京航空航天大学, 2005.

[7] 罗明东,吉洪湖,黄 伟,等. 涡扇发动机二元喷管热喷流的红外光谱辐射特性实验研究[J]. 推进技术, 2007, 28(2). (LUO Ming-dong, JI Hong-hu, HUANG Wei, et al. An experimental investigation on spectral infrated radiation characteristics of the enhaust jet from 2D nozzle of turbofan engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(2).)

[8] 罗明东,吉洪湖,黄 伟,等. 无加力高涵道比涡扇发动机二元喷管的红外辐射特性实验研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 631~ 636.

[9] Zachor A S, Hoizer J A, Smith F G. IR signature study[R]. *ADA* 072374.

[10] Marran D, Kenny P, Markham J, et al. The application of FTIR spectroscopy to turbine engine exhaust measurement[R]. *AIAA* 2000-2211.

[11] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. *NASA-SP* 3080, 1973.

(编辑:崔永刚)