

文章编号: 1000-8055(2007)12-2000-06

对流辐射板抑制涡扇发动机热喷流 红外辐射的实验

黄伟^{1,2}, 吉洪湖¹, 罗明东¹, 雷金果², 蔡旭¹, 高潮¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 徐州空军学院 航空四站系, 徐州 221000)

摘 要: 用对流辐射换热板来降低混合排气涡扇发动机热喷流的红外辐射, 并在涡扇发动机热喷流模拟实验台上进行了实验研究. 测量了安装对流辐射换热板前后, 轴对称喷管的热喷流的温度分布, 轴对称喷管和二元喷管的热喷流在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度. 结果表明: 对流辐射换热板可以降低热喷流高温核心区温度约 10%, 降低涡扇发动机热喷流的红外辐射强度约 20%~30%.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 热喷流; 涡扇发动机; 红外辐射(IR); 二元喷管

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experiment of IR suppression for hot plume from turbofan engine with convection radiation board

HUANG Wei^{1,2}, JI Hong-hu¹, LUO Ming-dong¹,
LEI Jin-guo², CAI Xu¹, GAO Chao¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Aerial Four Stations, Xuzhou Air Force College, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Convection radiation board was employed to suppress the infrared radiation of hot plume from turbofan engine, while experimental research was conducted on the hot plume simulation test bench of turbofan engine. The temperature distribution of hot plume from a pure axisymmetric nozzle, and the spectral radiant intensities of hot plume in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ from a pure axisymmetric nozzle and 2D nozzles were measured. The results show that convection radiation board could reduce the temperature of plume core about 10%, and also suppress the infrared radiation of hot plume from turbofan engine about 20%~30%.

Key words: aerospace propulsion system; hot plume; turbofan engine; infrared radiation (IR); 2D nozzle

在飞行马赫数不太高的情况下(通常小于2),发动机排气系统是飞机的主要红外辐射源,包括热喷流和喷管腔体内壁面两部分的红外辐射^[1].虽然无加力涡扇发动机热喷流的红外辐射在绝对值上远低于尾喷管内部的高温固体壁面,

但是它能传递到飞机的前向和侧向,成为红外制导武器在这些方向上的主要跟踪目标^[2],因此抑制热喷流的红外辐射对于提高飞机的战场生存力具有重要意义.

国外在热喷流红外抑制方面的研究开展得较

早, 并且已经在 F-117, B-2, F-22 和 X-45 等隐身飞机上不同程度地用波瓣喷管设计或二元喷管设计等红外隐身技术来强化冷空气与热喷流的掺混, 从而降低热喷流的红外辐射. 国内的学者也在该方面也展开了大量的研究: 张靖周等^[3]、翟普等^[4]、罗明东^[5-6]研究了波瓣喷管或大宽高比矩形喷管的强化掺混作用对热喷流红外辐射的抑制效果; 尚守堂、张青藩^[7]研究了激波反射装置对高温超声速热喷流红外辐射的抑制效果; 王广振等^[8]、黄勇等^[9]研究了小突片对热喷流红外辐射的抑制效果; 额日其太等^[10]研究了内、外涵混合排气对尾喷流红外辐射的抑制效果.

混合排气涡扇发动机的喷管内部存在明显的温度分布不均匀现象: 轴线附近燃气温度高, 喷管内壁面及附近燃气的温度低. 针对这种现象, 本文提出了用对流辐射换热板来降低热喷流的红外辐射, 其原理是: 首先通过换热板与高温燃气的对流换热吸收高温燃气的热量, 然后通过换热板与喷管壁面的辐射换热将这部分热量传递给喷管壁面; 因为喷管壁面的温度远低于换热板, 换热板吸收的辐射热量远低于自身发射的辐射热量, 因此可以通过换热板把高温燃气的热量不断传递到喷管壁面上, 实现降低高温燃气温度的作用, 从而降低热喷流的红外辐射.

本文通过模型实验, 测量了安装对流辐射换热板前后轴对称喷管热喷流的轴向温度分布以及轴对称喷管和二元喷管的热喷流的红外光谱辐射强度, 分析了对流辐射换热板对热喷流红外辐射特性的影响.

1 实验系统

本文的实验系统可分为四部分: 混合排气涡扇发动机热喷流实验台、喷管、对流辐射换热板和

测量系统等, 如图 1 所示. 为了表示方便, 图中只表示出了测量系统中的红外辐射测量系统部分.

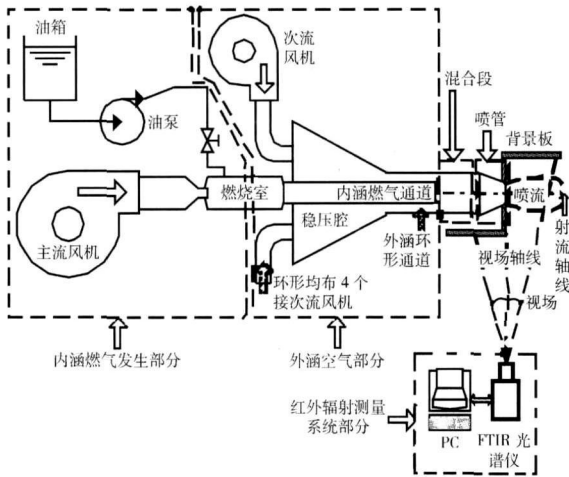


图 1 实验系统示意图
Fig. 1 Sketch map of experiment system

1.1 混合排气涡扇发动机热喷流实验台

混合排气涡扇发动机热喷流实验台包括图 1 中的内涵燃气发生部分、外涵空气部分和混合段. 内涵燃气发生部分提供内涵通道气流, 出口直径约 160 mm, 通道出口温度约 800 K; 外涵空气部分提供外涵环形通道气流, 出口直径约 230 mm, 通道出口温度约 300 K; 内、外涵气流的流量比为 1 左右, 在混合段内混合后经喷管排出.

1.2 喷管模型

实验中, 喷管的安装位置见图 1. 实验测量了基准轴对称喷管(编号为 AR0)热喷流在轴线上的温度分布, 测量了轴对称喷管和宽高比分别为 4, 8 的二元喷管(编号分别为 AR4, AR8)的热喷流的光谱辐射强度分布. 喷管的具体形状和尺寸如图 2 所示.

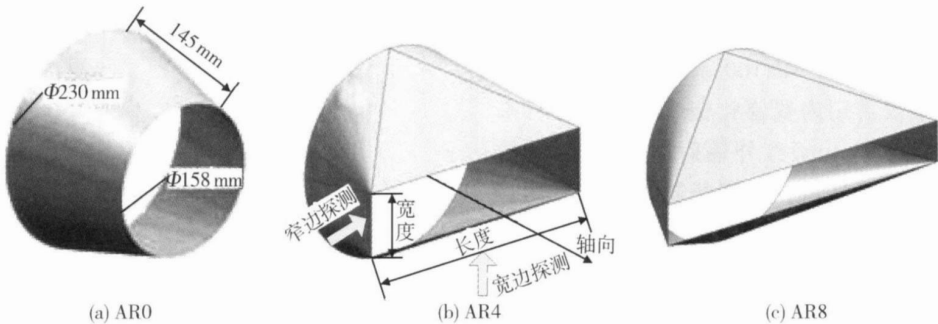


图 2 喷管模型示意图
Fig. 2 Illustration of nozzle models

其中,轴对称喷管 AR0 是参照国外某高涵道比涡扇发动机的喷管缩比获得,进口直径为 230 mm,出口直径为 158 mm,轴向长度为 145 mm.二元喷管 AR4 和 AR8 是根据 AR0 喷管进行等进出口面积、等轴向长度,简易过渡设计获得,圆转方过渡段由 4 片三角形板和 4 片圆弧形板组成.

由于二元喷管是非轴对称的,但又具有平面对称性,所以,实验中对二元喷管进行了宽边和窄边两个方向的测量,探测方向的定义见图 2(b),当喷管水平放置时为窄边探测,当喷管竖直放置时为宽边探测.

1.3 对流辐射换热板

本文设计了十字形对流辐射换热板,其形状和尺寸如图 3 所示,厚度很薄,以尽量减少流动阻力,安装在图 1 中的混合段内.

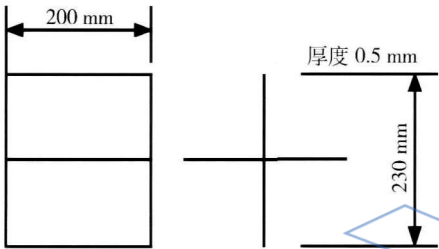


图 3 对流辐射换热板结构与尺寸

Fig.3 Shape and size of convection radiation board

1.4 测量系统

测量系统包括温度测量系统和红外辐射测量系统两部分.

温度测量系统由计算机、数据采集卡和热电偶组成.在 AR0 喷管的轴线上,采用镍铬-镍硅热电偶分别测量了距离喷管出口距离为 0D,0.5D,1D,1.5D,2D,3D,4D 和 5D 的探测点所对应的燃气在安装对流辐射换热板前后的温度值.

红外辐射测量系统部分由傅立叶变换红外光谱仪和计算机组成,见图 1.本文采用的是 BOMEN 公司生产的 MR100 系列傅立叶变换红外光谱仪,该仪器用内置碲化铟(InSb)探测器来测量中波的(3~5 μm)红外辐射.测量热喷流的红外辐射强度时,光谱仪的视场轴线方向与喷管轴线方向垂直,望远镜头与喷管出口的距离为 15 m.具体测量方法见参考文献[11].

2 实验结果

2.1 轴对称喷管热喷流在轴线上的温度分布

本文对温度测量结果进行了无因次处理,具

体结果如图 4.横坐标是轴向距离 X 与喷口出口直径 D 之比,纵坐标是喷流温度 T 与内涵燃气出口温度 T_h 之比.从图中可以看出,采用对流辐射换热板可以使得热喷流的温度明显降低,其中喷管出口附近轴线上的温度降低了 10% 左右.

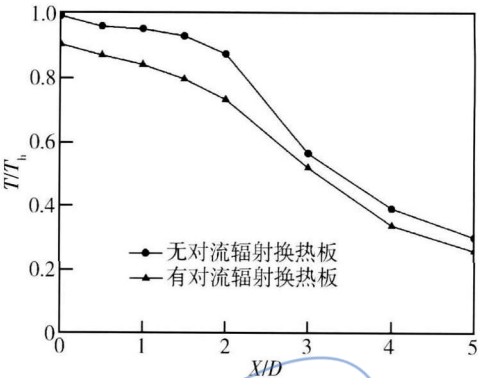


图 4 轴对称喷管热喷流在轴线上温度分布

Fig.4 Temperature distribution of hot plume along the axes of axisymmetric nozzle

2.2 喷管热喷流红外辐射测量结果

本文的红外辐射测量实验都在同一天的相近时段内完成,可以认为在整个实验过程中空气的温度、湿度等参数基本不变,因此实验数据处理中不考虑大气透过率的变化对实验结果的影响.图 5 为实验测得的 15 m 厚大气在 3~5 μm 波段的透过率,从图中可以看出大气在 4.26 μm 附近波段由于 CO₂ 的强烈吸收作用,透过率数值接近或等于零,因此在对实验数据处理过程中都把该波段的入射辐射理解为沿程大气的热辐射,不予考虑.大气透过曲线在 CO₂ 吸收带以外波段上的波动主要是 H₂O 的弱吸收引起的.

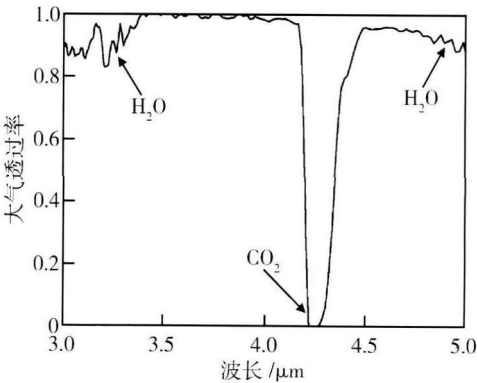


图 5 实验测量得到的大气光谱透过率分布

Fig.5 Spectral transmission distribution of atmosphere in the experiment

2.2.1 轴对称喷管热喷流的光谱辐射强度分布

图 6 为轴对称喷管的热喷流在 3~ 5 μm 波长范围内的光谱辐射强度分布, 图中实线和虚线分别是无对流辐射换热板和有辐射对流换热板时的光谱辐射强度.

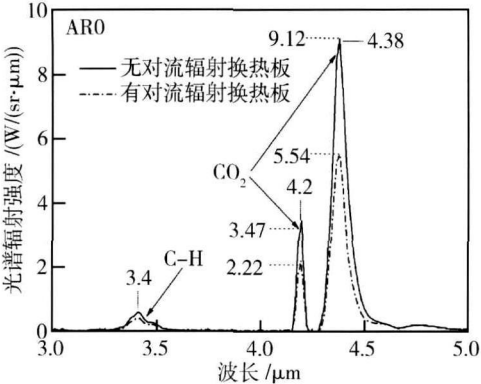


图 6 AR0 喷管热喷流的光谱辐射强度分布
Fig.6 Spectral radiant intensities distribution of the hot plume from AR0 nozzle

从图中可以看出热喷流的红外辐射具有明显的光谱选择性, 在 3.4 μm, 4.2 μm 和 4.38 μm 这三个波长附近存在明显的红外辐射. 其中, 3.4 μm 附近的红外辐射是由于实验中未燃烧完的炭氢化合物中的 C-H 伸缩振动产生的^[12], 因为真实发动机在非加力状态下的燃烧都比较完全, 所以该波段的红外辐射不是本文讨论的重点; 4.2 μm 和 4.38 μm 附近的红外辐射则是由于燃气内 CO₂ 的热辐射产生, 是本文讨论的重点.

从图 6 可以看出, 由于对流辐射换热板可以降低热喷流在核心区温度(如图 4 所示), 在安装对流辐射换热板以后, A R0 喷管的热喷流在 4.2 μm 和 4.38 μm 两个波长附近的光谱辐射强度明显降低, 但整个波段上光谱分布规律没有变化. 有对流辐射换热板时, AR0 喷管热喷流在 4.2 μm 和 4.38 μm 两处的峰值分别降低了 36.0% 和 39.3%.

将光谱辐射强度进行积分可以得到 AR0 喷管的热喷流在 3~ 5 μm 波段的辐射强度在采用对流辐射换热板以后, 从 0.927 W/ sr 降低到 0.625 W/ sr, 降低了 32.6%.

2.2.2 二元喷管热喷流的光谱辐射强度分布

图 7 和图 8 分别是宽边探测和窄边探测时 AR4 喷管热喷流的红外光谱辐射强度分布. 从图中可以看出 AR4 喷管的热喷流的光谱强度分布规律与 AR0 喷管相似, 只是幅值有所降低.

从图 6~ 图 8 可以看出, 由于二元喷管的强化掺混作用^[5]: (1) 从宽边探测时, AR4 喷管热喷流的光谱辐射强度在 4.2 μm 和 4.38 μm 两处的峰值比轴对称喷管分别下降了 52.7% 和 53.7%, 同时, 3~ 5 μm 波段的辐射强度降低了 57.0%; (2) 从窄边探测时, 光谱辐射强度的两个峰值分别降低了 59.7% 和 64.9%, 辐射强度降低了 59.9%.

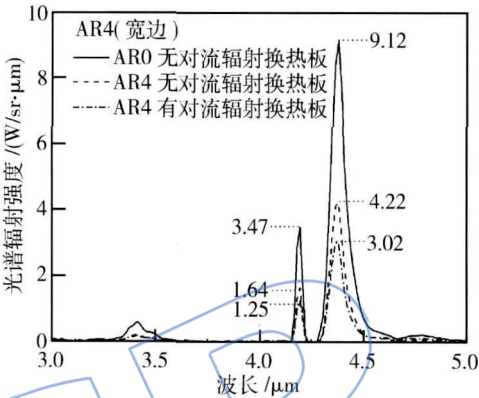


图 7 AR4 喷管热喷流在宽边的光谱辐射强度分布
Fig.7 Spectral radiant intensities Distribution of the hot plume from AR4 nozzle to the wide side

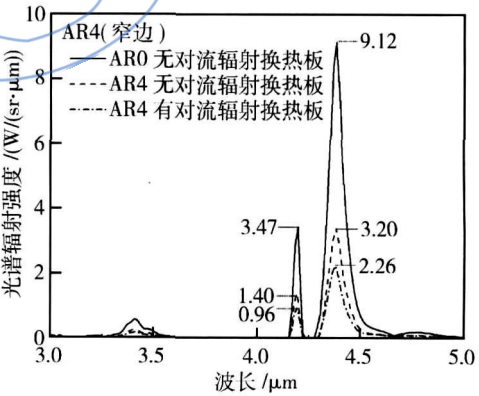


图 8 AR4 喷管热喷流在窄边的光谱辐射强度分布
Fig.8 Spectral radiant intensities distribution of the hot plume from AR4 nozzle to the narrow side

在有对流辐射换热板的情况下, 由于对流辐射换热板降低热喷流核心区温度的作用: (1) 从宽边探测时, AR4 喷管喷流的光谱辐射强度在 4.2 μm 和 4.38 μm 两处的峰值比无对流辐射换热板时分别降低了 52.7% 和 53.7%, 辐射强度降低了 57.0%; (2) 从窄边探测时, 热喷流的光谱辐射强度的两个峰值分别降低了 59.7% 和 64.9%, 辐射强度降低了 59.9%. 可见, 对流辐射换热板可在 AR4 喷管的基础上进一步降低热喷流的红外辐射, 使得热喷流在 3~ 5 μm 波段辐射强度在宽边和窄边分别降低到 AR0 喷管的 36.6% 和

29.5%.

图9和图10分别是AR8喷管的光谱红外辐射强度分布.从图中可以看出,在有对流辐射换热板的情况下:(1)从宽边探测时,AR8喷管热喷流的光谱辐射强度在 $4.2\mu\text{m}$ 和 $4.38\mu\text{m}$ 两处的峰值比无对流辐射换热板的情况分别降低了25.9%和27.8%,辐射强度降低了25.2%;(2)从窄边探测时,热喷流的光谱辐射强度的两个峰值分别降低了23.9%和25.0%,辐射强度降低了20.5%.可见,在AR8喷管上采用对流辐射换热板后,使得热喷流在宽边和窄边的辐射强度进一步降低到AR0喷管的20.2%和21.3%.

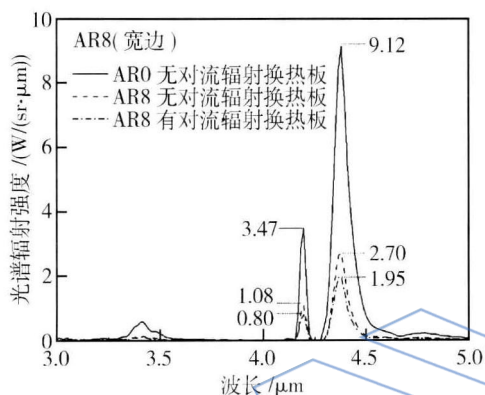


图9 AR8喷管热喷流在宽边的光谱辐射强度分布

Fig. 9 Spectral radiant intensities distribution of the hot plume from AR8 nozzle to the wide side

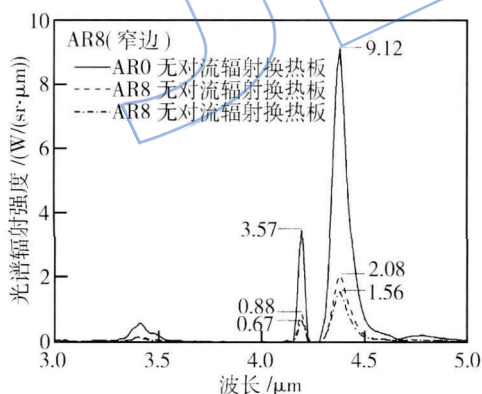


图10 AR8喷管热喷流在窄边的光谱辐射强度分布

Fig. 10 Spectral radiant intensities distribution of the hot plume from AR8 nozzle to the narrow side

从图6~图10可以看出,二元喷管设计和对流辐射换热板设计的综合抑制效果随着喷口宽高比的增加而提高.

3 结论

本文提出了采用对流辐射换热板来降低混合

排气涡扇发动机的热喷流的红外辐射,并在涡扇发动机热喷流模拟实验台上,测量了安装对流辐射换热板前后的轴对称喷管AR0热喷流在轴线上的温度分布以及轴对称喷管、AR4和AR8喷管的热喷流的光谱辐射强度分布,得到以下一些结论:

(1) 采用对流辐射换热板技术可以有效降低热喷流高温核心区温度,在本文的实验条件下,使得AR0喷管在出口处的温度降低了10%左右.

(2) 采用对流辐射换热板可以通过降低热喷流高温核心区温度来降低热喷流的红外辐射.在本文的实验条件下,换热板使得AR0喷管的热喷流的辐射强度降低32.6%左右,二元喷管的热喷流的辐射强度降低20%左右.

(3) 综合应用二元喷管技术和对流辐射换热板技术,可以明显降低热喷流的红外辐射,并且红外抑制效果随着喷口宽高比的增加而提高,其中在宽高比等于8的时候,热喷流的辐射强度降低到单纯轴对称喷管的21%左右.

(4) 虽然采用对流辐射换热板能够明显降低热喷流的红外辐射,但是换热板同时会增加喷管内固体壁面的红外辐射.因此,在实际应用中,对流辐射换热板技术必须进一步与其它红外隐身技术综合应用才能够实现排气系统的红外隐身.

参考文献:

- [1] 《航空发动机手册》编委会. 航空发动机手册第七分册 进排气装置[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 276-277.
- [2] 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, 12(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.
- [3] 张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 211-214.
ZHANG Jingzhou, LI Liguoguo, GAO Chao, et al. Experiment investigation of IR depress system on lobe nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(2): 211-214.
- [4] 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): 17-20.
ZHAI Pu, SUI Junyou, CHUI Jie, et al. A research on radiation restriction technology of a nozzle flow of aeror engine for missile[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(4): 17-20.
- [5] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 二元喷管热喷流的红外光谱辐射特性实验[J]. 推进技术, 2007, 28(2): 152-156.

- LUO Mingdong, JI Honghu, HUANG Wei, et al. Experiment on spectral infrared radiation characteristics of exhaust jet from 2D nozzle of turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 152-156.
- [6] 罗明东. 无人机排气系统红外隐身技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [7] 张青藩, 尚守堂. 一种抑制超声速气流红外辐射的新途径[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 67-71.
- ZHANG Qingfan, SHANG Shoutang. A new approach for suppression infrared radiation of supersonic jets[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(5): 67-71.
- [8] 王广振, 吴寿生, 王之珊, 等. 矩形主喷管带小突片的排气引射混合系统的试验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 151-154.
- WANG Guangzhen, WU Shousheng, WANG Zhishan, et al. An experimental research on the exhaust ejector-mixer system with tabs on a rectangular primary nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 151-154.
- [9] 黄勇, 郭志辉, 魏福清, 等. 收扩喷管加小突片对尾喷流红外辐射的影响[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 19-22.
- HUANG Yong, GUO Zhihui, WEI Fuqing, et al. Effect of tabs fixed on a convergent-divergent nozzle on infrared radiation of exhausting jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(1): 19-22.
- [10] 额日其太, 王强, 陈渭鹏. 两种涡扇发动机排气系统红外辐射特性的比较[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 334-336.
- ERiqitai, WANG Qiang, CHEN Weipeng. Comparative investigation of the infrared characteristics for two exhaust systems of a turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 334-336.
- [11] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1423-1429.
- LUO Mingdong, JI Honghu, HUANG Wei, et al. Research on measurement method of mid IR spectral radiate intensity of exhaust system with FTIR spectrometer[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1423-1429.
- [12] 范康年. 谱学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 63.