

S 弯二元喷管红外辐射特性实验

刘常春^{1,2}, 吉洪湖²

- (1. 中国航空发动机集团有限公司 商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 基于轴对称排气系统设计了一套 S 弯二元喷管的实验模型, 在实验工况下测量了喷管实验件的部分流场参数和远场红外辐射特性, 对 S 弯二元喷管的红外辐射特性进行了分析和研究, 并与基准轴对称喷管的红外辐射实验结果进行了对比。结果表明: 上方探测平面是 S 弯二元喷管的主要辐射方向, 其最大辐射角度为 15° , 在该方向角上固体壁面辐射的贡献最大。下方和侧向探测平面各方向角的红外辐射强度明显小于上方探测平面, 主要是由于 S 弯二元喷管遮挡了大部分的内部高温壁面。与基准轴对称喷管对比, S 弯二元喷管有着明显的红外抑制作用, 在尾部方向 S 弯二元喷管的积分辐射强度相比轴对称喷管降低了 81%, 最大辐射强度相比轴对称喷管降低了 47%, 燃气辐射降低 50%。

关 键 词: 排气系统; S 弯; 二元喷管; 红外辐射; 实验特征

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on infrared radiation characteristics of S shaped 2D nozzle

LIU Changchun^{1,2}, JI Honghu²

- (1. Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China;

2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A experiment model of S shaped 2D nozzle was designed based on axisymmetric exhaust system and studied on the infrared characteristic experiment rig. Flow parameters and the far field infrared radiation characteristics of the experiment model were measured under experimental conditions, and compared with the baseline axisymmetric nozzle experiment data. Results showed that, infrared radiation power of S shaped 2D nozzle was mainly in the upper detection plane, and the maximum radiation was in 15° degrees, due to the largest radiation contribution of solid walls in this direction angle. Infrared radiation power in lower and side detection plane was much less than that in upper detection plane because of the shielding effect of S shaped 2D nozzle. Compared with the axisymmetric nozzle, S shaped 2D nozzle had significant effect of infrared suppression, the infrared signature of the S shaped 2D nozzle reduced by 81% in the rear direction, and the maximum radiation intensity reduced by 47%, while the gas radiation reduced by 50%.

Key words: exhaust system; S shaped; two-dimensional nozzle;
infrared radiation; experimental characteristics

收稿日期: 2019-01-01

作者简介: 刘常春(1986—), 男, 博士生, 主要从事航空发动机进排气技术研究。

引用格式: 刘常春, 吉洪湖. S 弯二元喷管红外辐射特性实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(7): 1493-1500. LIU Changchun, JI Honghu. Experiment on infrared radiation characteristics of S shaped 2D nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1493-1500.

随着先进的搜索跟踪系统、地空导弹防御系统和空空武器装备的迅速发展,飞行器的战场生存环境日趋恶化。对飞机红外特性的研究表明^[1-2],喷气式飞机的主要红外辐射源是排气系统和飞机蒙皮,在飞行马赫数小于 1.5 的情况下,排气系统的红外辐射贡献占飞机在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段内红外辐射总量的 90% 以上,发展排气系统的红外抑制技术是提高飞机生存力的关键之一。

S 弯流道是一种可以大幅度削减发动机特征信号的隐身技术,其典型应用是 S 弯进气道,将进气道设计成 S 形可以缩减飞行器头向重点姿态角域内的雷达散射截面,达到隐身的目的^[3]。近年来,S 弯流道被运用于发动机排气系统设计,概念逐渐被提出和论证。S 弯喷管不仅可以有效遮挡发动机的高温热部件,大幅削减排气系统的红外辐射特征,同时还能缩减排气系统的雷达散射面积,达到红外隐身与雷达隐身的综合隐身效果,这与无人机、轰炸机和侦察机等这一类机动性较低的飞机对超隐身能力的需求是高度契合的。可以预见,S 弯喷管配合发动机埋入式安装技术势必在未来隐身飞行器上有着更广阔的应用前景。

目前,公开发表的文献中对于 S 弯喷管的研究还比较少。Stronach^[4]对 3 种不同宽高比和偏距的 S 弯二元喷管进行了流动的数值模拟和实验研究。Johansson 等^[5]对比计算了常规轴对称喷管和 S 弯二元低可探测特征喷管的红外辐射,结果表明在下方与侧方探测面内 S 弯二元低可探测特征喷管的红外辐射明显低于常规轴对称喷管。除此之外,国内也有学者先后开展了相关的工作。刘常春等^[6-7]对 S 弯二元喷管的红外辐射特性开展了数值仿真研究;刘友宏等^[8]通过数值仿真方法研究了波瓣混合器对 S 弯二元喷管气动性能的影响;刘常春等^[9-14]陆续开展了对双 S 弯喷管的流动特征与红外辐射特性研究;卫永斌等^[15]对更为复杂的多 S 弯喷管开展了参数化设计。以上研究工作表明了 S 弯喷管具有优秀的红外隐身性能,但目前主要的研究结论还局限于数值仿真方面,缺乏相关的实验研究。

本文设计了一整套 S 弯二元喷管的实验台模型,在实验工况下测量了喷管实验件的部分流场参数,同时对其远场红外辐射特性开展了实验测量,并与基准轴对称喷管的红外辐射实验结果进行了对比,来对 S 弯二元喷管的红外辐射特性进行分析和研究。

1 实验系统

1.1 实验台

图 1 为实验中采用的涡扇发动机排气系统红外特征模拟实验台,主要由以下几部分组成:内涵气流系统、外涵气流系统和实验段。内涵气流系统包括内涵气流风机及电动机、点火与供油控制台和燃烧室,外涵气流系统包括外涵气流风机及电机、软管和外涵气流混合收敛段,实验段中包括模拟涡轮、中心锥、支板以及喷管实验件。内、外涵气流风机均可提供 1 kg/s 以上的流量,流量大小可调,内涵高温气体由单管燃烧室加热产生,燃烧室出口的温度可以达到 800 K 以上。

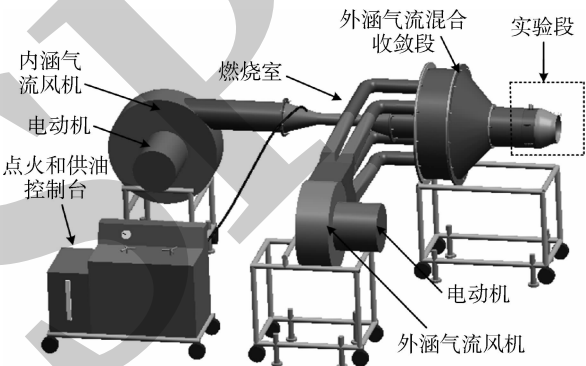


图 1 涡扇发动机排气系统红外特征模拟实验台
Fig. 1 Infrared characteristics simulation experiment rig of turbofan engine exhaust system

1.2 实验模型

本文的研究工作基于某型涡扇发动机的轴对称混合排气系统,图 2 给出了该排气系统的示意图,主要由涡轮模拟器、中心锥、支板、轴对称混合器和轴对称喷管组成。

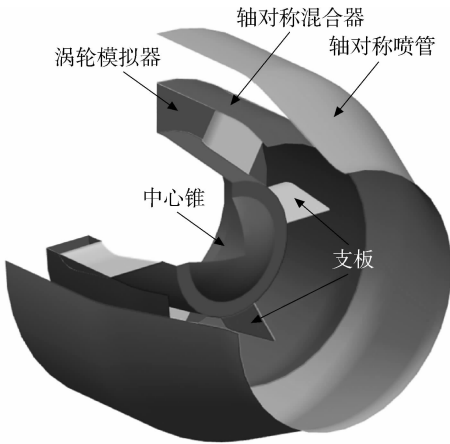


图 2 基准轴对称混合排气系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of baseline axisymmetric mixing exhaust system

器和轴对称喷管组成。

S 弯二元喷管的物理模型如图 3 所示,喷管型面为从圆形进口光滑过渡到矩形出口的 S 形流道,由圆角矩形过渡截面轮廓沿 S 形中心线扫掠形成。为配合 S 弯二元喷管,在原混合器的基础上重新设计了非轴对称式的混合器,一方面是使内涵气流能够较为顺畅的排出喷管,另一方面是为了在改型设计中匹配发动机的流量特性^[16-17]。

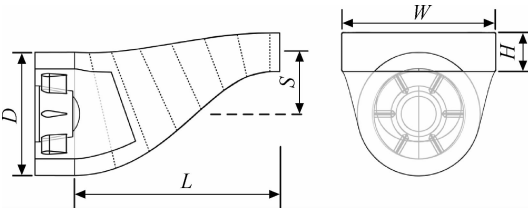


图 3 S 弯二元喷管的物理模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of S shaped 2D nozzle physical model

S 弯二元喷管的几何参数主要包括以下几方面:进口直径 D 、喷管长度 L 、出口宽度 W 、出口高度 H 以及偏距 S ,详细的设计参数如表 1 所列。

表 1 S 弯二元喷管设计参数

Table 1 Design parameters of S shaped 2D nozzle

参数	数值
喷管长径比 L/D	1.59
喷管出口宽高比 W/H	4
喷管出口偏径比 S/D	0.5

装配至排气系统红外特征模拟实验台的 S 弯二元喷管实验件模型如图 4 所示,在喷管进口处采用法兰安装,混合器采用卡扣结构与实验台进

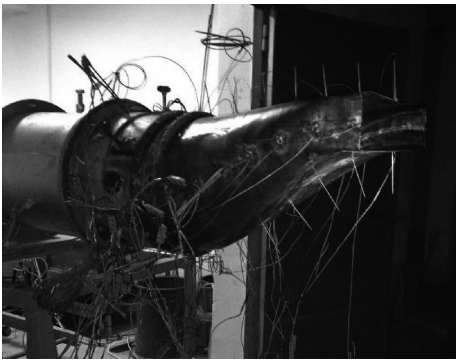


图 4 装配在实验台上的 S 弯二元喷管实验模型
Fig. 4 S shaped 2D nozzle experimental model assembled on experiment rig

行连接,避免因法兰结构带来的气动损失。涡轮模拟器、中心锥和支板结构与轴对称排气系统一致。

2 实验方法

2.1 流量、压力和温度测量

实验中,内、外涵气流分别由两台高压离心风机提供,风机转速用电源变频器控制,通过改变风机转速来调节流量。在风机进气管中安装有孔板流量计。当空气流过孔板,流速增加,流束集中,静压降低,在孔板上下游造成静压差,通过测量该静压差换算得到流量。经过标定与测算,该流量测量系统误差不超过 2%。

实验段进口截面上每隔 120°布置有总压和总温测量耙,每个耙上布置了 6 个测点,测量了实验段系统进口截面的总压与总温分布。喷管各部件壁面上均布置了一定数量的静压和静温测量点,包括中心锥壁面的静温、混合器壁面静压、喷管壁面的静压和静温,壁面上的静压和静温测点位置如图 5 所示。压力采用 U 型管压力计测量,温度采用 K 分度镍铬-镍硅铠装热电偶,并采用 JK-64 型多通道巡检仪进行采集。

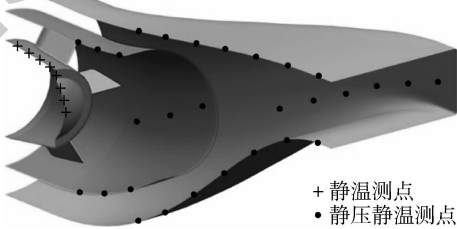


图 5 壁面上的静压和静温测量点
Fig. 5 Static pressure and static temperature measurement points on the wall

2.2 红外辐射特性测量

红外辐射测量系统如图 6 所示,由傅里叶变换红外光谱辐射计、采集计算机和标定黑体组成。红外光谱辐射计对 3~5 μm 波段的中红外辐射信号的光电转换是通过用碲化钢探测器来完成的,由于碲化钢探测器必须在温度小于 100 K 的情况下才能正常工作,因此在实验过程中必须用液氮对其进行制冷。用傅里叶变换红外光谱辐射计测量红外辐射时,通常首先用一个低温黑体炉(323 K)和一个高温黑体炉(573 K)进行标定,获得标定系数,然后在实验测量中,再采用一个中温黑体炉(423 K)进行实时测量校对,获得实时的修正系

数,以降低仪器漂移带来的误差。具体的标定和测量方法见文献[18]。

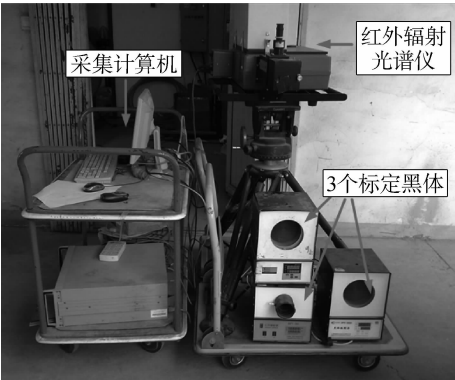


图 6 红外辐射测量系统
Fig. 6 Infrared radiation measurement system

为了得到 S 弯二元喷管的红外辐射特性空间分布规律,分别对上方、下方和侧向探测平面内的红外辐射进行了测量,如图 7 所示,每个探测平面布置了 11 个测量点,分别是探测角 $\alpha=0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$, 喷管出口到光谱辐射计之间的探测距离 $R=34.5\text{ m}$ 。

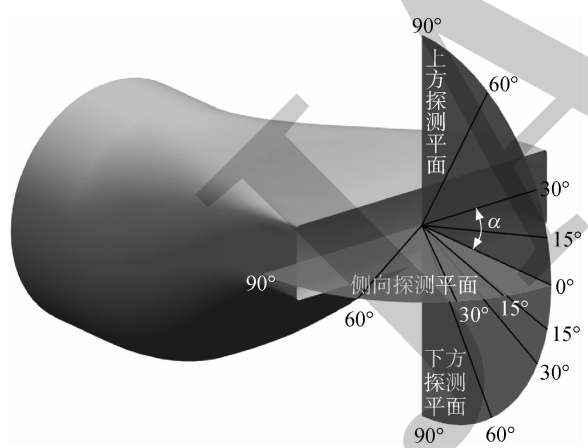


图 7 红外辐射探测点的设置
Fig. 7 Infrared radiation detection points setting

2.3 实验工况

本文的实验工况设置见表 2,其中外涵的流量根据实验台可提供的最大空气量设定,内涵的流量根据发动机的工况换算设定,保证实验模型的工况能够模拟与发动机相同的涵道比。内、外涵的气流温度与发动机实际工况相当,即内涵为高温燃气,外涵为冷气,使得喷管各部件壁面温度接近发动机实际工况,以模拟发动机的红外辐射特性。喷管外的环境参数为标准大气压力和温度。

表 2 实验工况设置
Table 2 Experimental condition setting

参数	内涵进口	外涵进口	环境参数
流量/(kg/s)	0.18	1.2	
总压/Pa			101325
总温/K	830	315	280

3 实验结果分析

3.1 温度测量结果分析

壁面温度是影响排气系统红外辐射特性的主要参数之一,它主要决定了固体壁面的红外辐射大小。图 8 所示为中心锥壁面上沿轴向方向上的温度实验值。可以看到,中心锥的壁面温度与内涵进口温度接近,沿着轴向流动方向中心锥壁面的温度呈逐渐降低的趋势。

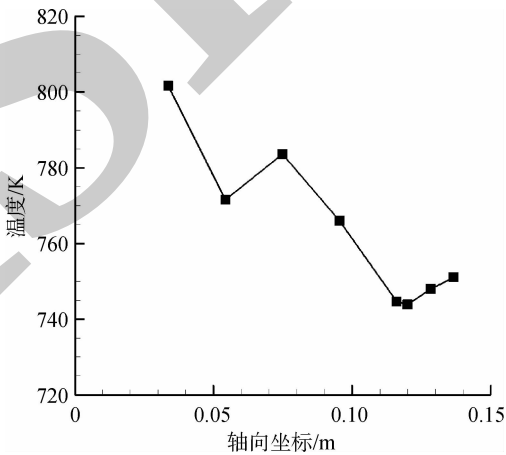


图 8 中心锥温度沿轴向的分布
Fig. 8 Centerbody temperature distribution along axial direction

图 9 所示为喷管壁面上沿轴向方向上的温度分布实验值。从图中可以看到,喷管侧向壁面上的温度与外涵气流温度接近,且沿着轴向流动方向的变化不大,说明侧向壁面仅仅受外涵气流的影响。与侧向壁面不同的是,喷管上侧壁面和喷管下侧壁面的温度沿轴向流动方向有着比较明显的升高趋势。在测量起始点处上下侧壁面温度与外涵气流温度接近,当靠近喷口位置时,喷管壁面的温度急剧的升高,这与喷管的圆转矩过渡型面有关,经过混合器后的内涵高温燃气核在靠近喷口位置处对喷管上下侧壁面有比较明显的冲刷作用,导致喷口处位置上的温度升高,这在一定程度上会增加一部分喷管壁面的红外辐射贡献。

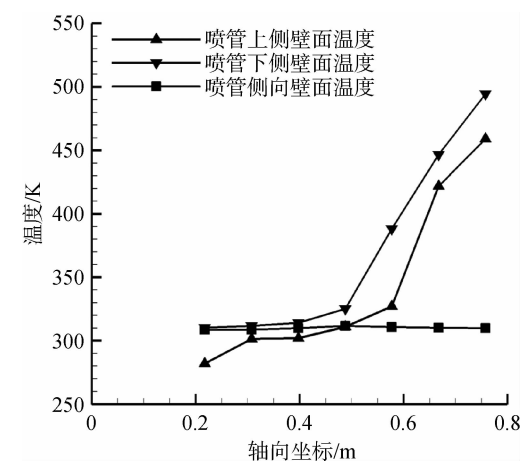


图 9 喷管壁面温度沿轴向的分布

Fig. 9 Nozzle wall temperature distribution along axial direction

3.2 红外辐射特性分析

图 10 给出了 S 弯二元喷管在上方探测平面内的无量纲光谱辐射强度测量结果,图中 λ 表示红外光谱波长。从图中可以看到,3~5 μm 内的光谱辐射强度主要由两部分组成:一部分是高温壁面在 3~4.15 μm 和 4.6~5 μm 波段内的固体辐射;另一部分是 4.15~4.6 μm 波段内的燃气辐射。固体辐射的特点是全波段辐射,其在整个波长范围内的辐射分布是连续的;气体辐射的特点是选择性辐射,如 4.15~4.6 μm 波段内的波峰和波谷则是由燃气中 CO_2 强发射和空气中 CO_2 的强吸收作用产生的,3~3.4 μm 波段内的小幅波动是由燃气和空气中的 H_2O 的发射和吸收作用产生的。在上方探测平面内,随着 α 的增大,固体辐射逐渐增大,在 $\alpha=15^\circ$ 时固体辐射线的高度最高。随着 α 进一步增大,固体辐射转而降低,当 $\alpha=75^\circ$ 时,固体辐射基本降为零,这主要是由排气系统内部固体壁面的可视面积变化而导致的。在 4.15~4.6 μm 波段内, α 在 $0^\circ\sim30^\circ$ 范围增大时,燃气辐射逐渐增大,随着 α 进一步增大,燃气辐射的宽度和高度逐渐变窄,这主要是由于小方位角范围内,燃气的投影面积随 α 的增大而增大,而当方位角足够大时,排气系统内部的高温燃气被逐渐遮挡,导致燃气辐射降低。

图 11 给出了 S 弯二元喷管在下方探测平面内的无量纲光谱辐射强度测量结果。可以看到,下方探测平面各方向角的红外辐射强度明显小于上方探测平面,尤其是固体辐射部分。从各方向角的分布来看,固体辐射先增大后减小,在 $\alpha=20^\circ$ 方向达到最大,这主要是由于喷管上侧壁面靠近

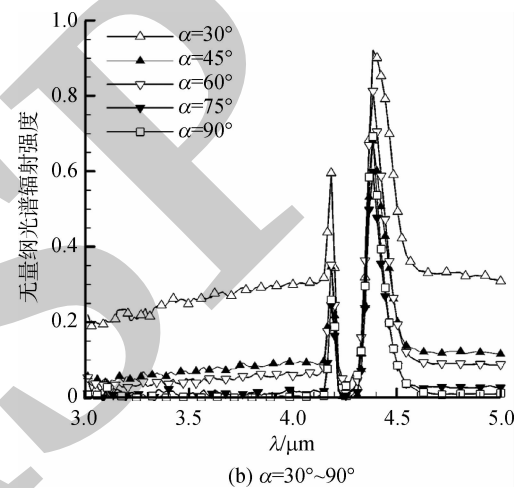
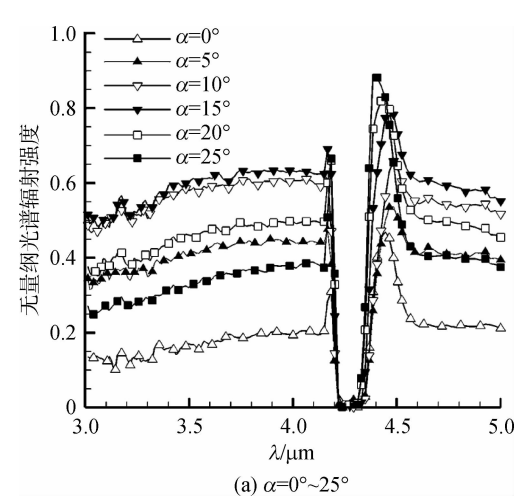
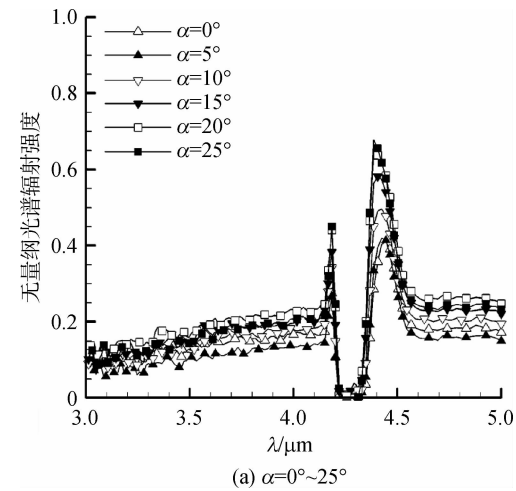


图 10 上方探测平面内的无量纲光谱辐射强度
Fig. 10 Nondimensional spectral radiation intensity on the upper detection plane

喷口的高温区域导致的,在 $\alpha=0^\circ$ 时这部分区域被遮挡,当探测器偏转一定的角度,该区域则逐渐出现在探测窗口内。当 $\alpha=75^\circ$ 时,固体壁面基本完全被遮挡,固体辐射基本降低零。在 4.15~4.6



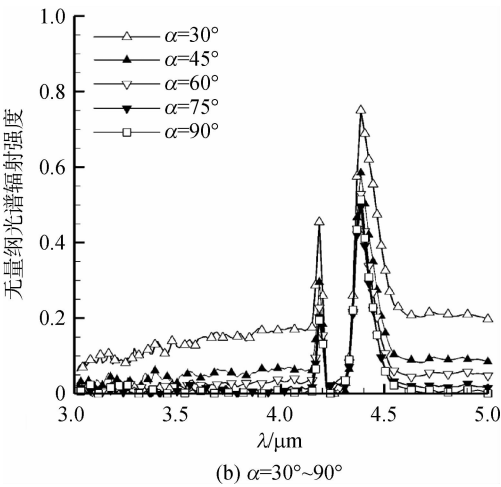


图 11 下方探测平面内的无量纲光谱辐射强度
Fig. 11 Nondimensional spectral radiation intensity on the lower detection plane

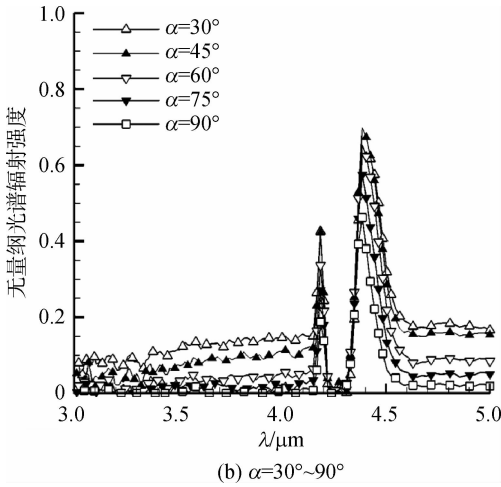
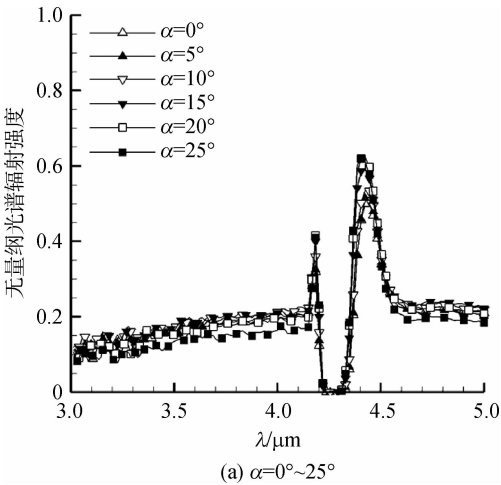


图 12 侧向探测平面内的无量纲光谱辐射强度
Fig. 12 Nondimensional spectral radiation intensity on the side detection plane

μm 波段内的气体辐射特性与上方探测平面相一致,且随方位角的变化规律与上方探测平面相同。

图 12 给出了 S 弯二元喷管在侧向探测平面内的无量纲光谱辐射强度测量结果。与以上两个探测平面相比,侧向探测平面的红外辐射强度明显小于上方探测平面,与下方探测平面相当。另外,侧向探测平面内在小方位角内的固体辐射变化不大,呈缓慢减小的趋势, α 在 $30^\circ\sim 75^\circ$ 范围内固体辐射逐渐降低为零。在 $4.15\sim 4.6\mu\text{m}$ 波段内的气体辐射特性与另外两个探测平面很接近,但幅值略低一些。

基准轴对称喷管和 S 弯二元喷管的红外辐射测量是在相同的工况下开展的。对于 S 弯二元喷管来说,基准轴对称喷管的红外辐射特性是重要的参考。图 13 给出了基准轴对称喷管和 S 弯二元喷管在上方、侧向和下方 3 个探测平面内的无量纲积分辐射强度测量结果对比。由图可见,基



准轴对称喷管的积分辐射强度曲线呈典型的“梨”形包络状, $\alpha=5^\circ$ 的积分辐射值略大于 $\alpha=0^\circ$ 方向,随着 α 的增大,积分辐射强度逐渐降低。将 S 弯二元喷管的红外辐射特性与基准轴对称喷管进行综合对比来看,S 弯二元喷管有着显著的红外抑制效果,尤其是在尾向、侧向和下方的观测范围内,主要表现在以下几点:①从尾向($\alpha=0^\circ$)来看,S 弯二元喷管的积分辐射强度相比轴对称喷管降低了 81%;在下方探测平面,S 弯二元喷管的最大辐射角度为 20° ,其辐射值相对基准轴对称喷管在该方向上的降幅约为 69%,相对基准轴对称喷管辐射最大值(5° 方向)的降幅约为 78%;在侧向探测平面,S 弯二元喷管的最大辐射角度为 15° ,其辐射值相对基准轴对称喷管在该方向上的降幅约为 73%,相对基准轴对称喷管辐射最大值(5° 方向)的降幅约为 80%;在上方探测平面,S 弯二元喷管的最大辐射角度为 15° ,其辐射值相对基准轴对称喷管在该方向上的降幅约为 29%,相对基准轴对称喷管辐射最大值(5° 方向)的降幅约为 47%。②上方探测平面是 S 弯二元喷管的主要辐射方向,其在小方位角上的红外辐射强度比下方和侧向探测平面内的红外辐射强度大,主要是由于喷管内高温壁面的可视面积分布不同的缘故。③在 3 个探测平面内 $\alpha=90^\circ$ 的方向上,高温壁面的投影面积为零,辐射贡献来自于喷管排出的燃气,其积分辐射强度值相比基准轴对称喷管降幅约为 50%,且各个探测面之间的辐射值相差不大,侧向略低一些,主要是由于在各个方向上的燃气辐射在经过大气吸收后的绝对值变得很小,燃气流的投影面积变化引起的辐射强度差别不明显。

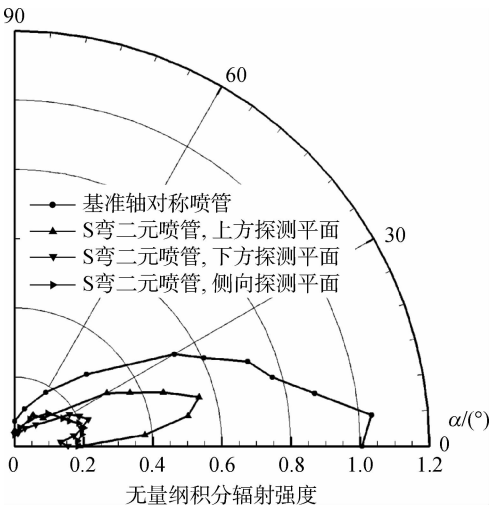


图 13 轴对称喷管和 S 弯二元喷管无量纲积分辐射强度实验结果对比

Fig. 13 Comparison of nondimensional integral radiation intensity between axisymmetric nozzle and S shaped 2D nozzle

4 结 论

通过上述对 S 弯二元喷管的流场参数与红外辐射特性的实验结果分析,可以得出如下结论:

1) 上方探测平面是 S 弯二元喷管的主要辐射方向,其最大辐射角度为 15°,在该方向角上固体壁面辐射的贡献最大。

2) 下方和侧向探测平面各方向角的红外辐射强度明显小于上方探测平面,主要是由于 S 弯二元喷管遮挡了大部分的内部高温壁面。

3) 各个探测平面内的燃气辐射相差不大,侧向探测平面略小于上方和下方探测平面。

4) 与基准轴对称喷管对比,S 弯二元喷管有着明显的红外抑制作用,在尾部方向($\alpha=0^\circ$)S 弯二元喷管的积分辐射强度相比轴对称喷管降低了 81%,最大辐射强度($\alpha=15^\circ$)相比轴对称喷管降低了 47%,燃气辐射($\alpha=90^\circ$)降低 50%。

参考文献:

[1] 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和分析[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. (in Chinese)

[2] MAHULIKAR S P,SONAWANE H R,ARVIND R G. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences,2007,43(7):218-245.

[3] GRIDLEY M C,WALKER S H. Inlet and nozzle technology for 21st century fighter aircraft[R]. ASME Paper 96-GT-244,1996.

[4] STRONACH A J. Experimental and numerical evaluation of circular to oblong gas turbine transition ducts with offset[D]. Kingston,Jamaica:Queen's University,2000.

[5] JOHANSSON M,DALENBRING M. Calculation of IR signatures from airborne vehicles[C]// Proceeding of Defense and Security Symposium. Orlando,US; the International Society for Optics and Photonics,2006:622813. 1-622813. 12.

[6] 刘常春,吉洪湖,李娜,等. 一种二元 S 弯喷管的红外辐射特性数值研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(9):1567-1570.
LIU Changchun,JI Honghu,LI Na,et al. Numerical simulation on infrared radiant characteristics of 2D S-nozzles[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2010,31(9): 1567-1570. (in Chinese)

[7] 于明飞,吉洪湖,李宁,等. 小偏距 S 弯二元喷管的红外辐射特性数值分析[J]. 航空动力学报,2015,30(9):2080-2087.
YU Mingfei,JI Honghu,LI Ning,et al. Numerical analysis on infrared radiation characteristics of two-dimensional S-nozzle with small offset[J]. Journal of Aerospace Power, 2015,30(9):2080-2087. (in Chinese)

[8] 刘友宏,陈中原. 非对称波瓣上外扩张角对 S 弯二元喷管性能影响[J]. 推进技术,2015,36(11):1616-1622.
LIU Youhong,CHEN Zhongyuan. Effects of upward-outward penetration angle of asymmetric lobed mixer on aerothermodynamic performance of an S-shaped two-dimensional nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology,2015, 36(11):1616-1622. (in Chinese)

[9] 刘常春,吉洪湖,黄伟,等. 一种双 S 弯二元喷管的红外辐射特性数值研究[J]. 航空动力学报,2013,28(7):1482-1488.
LIU Changchun,JI Honghu,HUANG Wei,et al. Numerical simulation on infrared radiation characteristics of serpentine 2D nozzle[J]. Journal of Aerospace Power,2013, 28(7):1482-1488. (in Chinese)

[10] 章叶川,王占学,史经纬,等. 双 S 弯喷管流动特性及红外辐射特性分析[J]. 航空动力学报,2013,28(11):2468-2474.
ZHANG Yechuan,WANG Zhanxue,SHI Jingwei,et al. Analysis on flow and infrared radiation characteristics of double S-nozzle[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28 (11):2468-2474. (in Chinese)

[11] 孙啸林,王占学,周莉,等. 基于多参数耦合的 S 弯隐身喷管设计方法研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(11): 2371-2375.
SUN Xiaolin,WANG Zhanxue,ZHOU Li,et al. The design method of serpentine stealth nozzle based on coupled parameters[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015,36(11):2371-2375. (in Chinese)

[12] 高翔,杨青真,施永强,等. 出口形式对双 S 弯排气系统红外特性影响研究[J]. 红外与激光工程,2015,44(6):1726-1732.

GAO Xiang,YANG Qingzhen,SHI Yongqiang,et al. Numerical simulation of radiation intensity of double S-shaped exhaust system with different outlet shapes[J]. Infrared and Laser Engineering,2015,44(6):1726-1732. (in Chinese)

[13] 王丁,吉洪湖,刘常春,等. 截面变化类型对双 S 形二元排气系统性能的影响[J]. 推进技术,2017,38(1):47-53.

WANG Ding,JI Honghu,LIU Changchun,et al. Effects of transection transformation form on performance of serpentine 2-D exhaust system[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(1):47-53. (in Chinese)

[14] 廖华琳,张勃,邓庆晃,等. 不同形式喷管流动与红外抑制特性数值分析[J]. 红外技术,2017,39(10):958-965.

LIAO Hualin,ZHANG Bo,DENG Qinghuang,et al. Numerical investigation of flow and infrared suppressing characteristics of nozzles in different style[J]. Infrared Technology,2017,39(10):958-965. (in Chinese)

[15] 卫永斌,艾俊强. 并列双发三维非对称多 S 弯喷管参数化设计方法[J]. 航空动力学报,2015,30(2):271-280.

WEI Yongbin,AI Junqiang. Parameter design method of double juxtaposition 3-D asymmetric several-S-shaped nozzles[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(2):271-280. (in Chinese)

[16] 陈玉春,黄兴,高本兵,等. 发动机总体与尾喷管三维并行设计研究[J]. 航空动力学报,2007,22(10):1695-1699.

CHEN Yuchun,HUANG Xing,GAO Benbing,et al. Parallel design of turbo engine and three-dimensional nozzle[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(10):1695-1699. (in Chinese)

[17] 李娜,吉洪湖. 混合排气二元收敛喷管与发动机流量匹配设计方法[J]. 航空动力学报,2011,26(9):2141-2147.

LI Na,JI Honghu. Study on matching method for core and bypass mass flux of 2-D convergent nozzle of mix-ed flow[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(9):2141-2147. (in Chinese)

[18] 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[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 radiant intensity of exhaust system with FTIR spectrometer[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(9):1423-1429. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)