

文章编号:1000-8055(2011)02-0343-06

遮挡板结构对二元喷管红外辐射特性的影响

范仁钰, 张靖周, 单 勇

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在宽高比 3.33 的圆转矩形二元喷管的出口处安装下遮挡板,通过基于计算流体动力学/红外辐射(CFD/IR)数值模拟的方法来研究遮挡板结构对喷管壁面和尾焰的红外辐射强度的抑制效果.研究表明带狭缝气膜冷却的双层遮挡板对排气系统的红外辐射具有更为显著的抑制效果.

关 键 词: 排气系统; 二元喷管; 红外辐射; 遮挡板; 计算流体动力学

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Effects of sheltering baffles on the infrared radiation characteristics of two-dimensional nozzles

FANG Ren-yu, ZHANG Jing-zhou, SHAN Yong

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The non-axis-symmetric circular-to-rectangular nozzle is capable of suppressing the infrared radiation signature with less performance loss compared to axis-symmetric nozzle. This paper researched the effects of different sheltering baffle structures on the infrared radiation suppression of the two-dimensional nozzle with aspect ratio 3.33 by computational fluid dynamics/infrared radiation (CFD/IR) numerical simulation. The investigation shows that the double-sheltering baffles with film slots on the upper sheltering baffle have more obvious infrared radiation suppression effect.

Key words: exhaust system; two-dimensional (2-D) nozzle; infrared radiation; sheltering baffles; computational fluid dynamics (CFD)

飞行器的红外辐射信号主要来自暴露的发动机排气系统热部件、热喷流和高速飞行时承受气动加热的蒙皮,其中发动机排气喷管的红外辐射是尾向探测最严重的红外辐射源.针对如何降低飞行器尾喷管的红外辐射,大量研究表明二元喷管是一种具有较好红外隐身性能的结构型式^[1-8],在诸多飞行器上已得到实际应用.为了进一步抑制排气喷管的红外辐射,可以通过喷口尾缘的遮挡板对喷管腔体和热喷流高温核心区进行局部遮挡,从而降低侧下方探测的红外辐射强度.这种喷口下遮挡结构可以与飞行器机身的尾翼和机身背

部一体化设计,对发动机喷口的红外辐射起到有效的遮挡作用.

南京航空航天大学的罗昕等^[9]对单、双层下遮挡结构对红外辐射的影响进行了研究.本文在此基础上,进一步改变遮挡结构,运用 Fluent-CFD(computational fluid dynamics)软件和自主编制的红外辐射计算程序,计算了加装不同间距的遮挡板、在双层遮挡板间隙通道引射及强迫注气冷却、在双层遮挡板的上遮挡板气冷却等多种结构的二元喷管红外辐射强度分布,研究遮挡板结构对喷口红外辐射的抑制效果.

收稿日期:2009-12-23; 修订日期:2010-05-31

作者简介:范仁钰(1986—),男,福建三明人,硕士生,主要从事飞行器排气系统红外隐身技术的研究.

1 喷管模型

本文以出口截面宽高比为 3.33 的二元喷管为基准喷管模型,建立圆转矩形二元喷管的模型,过渡型面约束条件为等截面积的圆转矩形,由超椭圆方程 $(Z/a)^n + (Y/b)^n = 1$ 计算得到^[10]. 喷管进口直径为 $D=1082\text{ mm}$ 的圆形截面,出口为宽 $(W)1750\text{ mm}$,高 $(H)525.5\text{ mm}$ 的矩形截面. 喷管总体长 1082 mm ,从进口至出口保持截面面积为 919018.34 mm^2 .

图 1 为几种喷管结构示意图,其中图 1(a)为基准二元喷管;图 1(b)在基准喷管出口下沿设置单层遮挡板;图 1(c)为双层下遮挡板结构,板间距分别为 10,25 mm 和 30 mm;图 1(d)为双层下遮挡开缝结构,即在上遮挡板上开设 8 个狭缝,缝与缝间距为 120 mm,狭缝带或不带导流舌片,舌片为长边 10 mm,短边 8 mm 的 1/4 椭圆与平行于挡板边 2 mm 长的直线所组成的组合线. 遮挡板长为 1 倍喷管进口直径,即 $L/D=1$. 详细参数见表 1. 模型 3 至模型 6 的挡板间进口流量分别按引射状态、主流 0.3% 和 1% 注入给定,对应的工况分别标为 1,2 和 3.

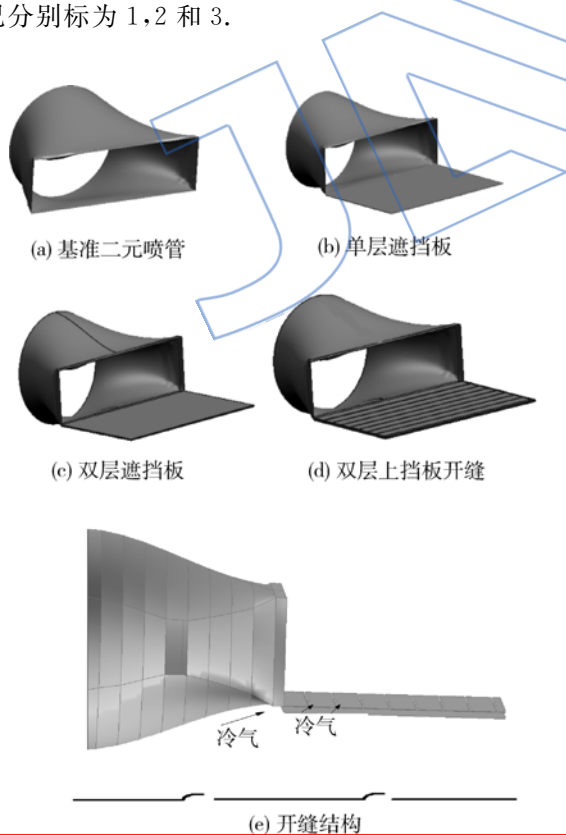


图 1 几种喷管模型结构示意图
Fig. 1 Schematic of nozzles structure

表 1 遮挡板结构参数

Table 1 Structure parameters of sheltering baffles

编号	挡板	板间距/mm	缝宽/mm	开缝数
模型 1	无			
模型 2	单层			
模型 3	双层	10		
模型 4	双层	25		
模型 5	双层	30		
模型 6	狭缝无舌片	10	10	8
模型 7	狭缝带舌片	10	10	8

2 计算方法

2.1 流场计算

流场计算使用 Fluent-CFD 软件. 圆转矩形过渡型面较为复杂,计算中对二元喷管内流通道采用非结构化网格,外场采用结构化网格,通过网格试验,选取整个计算区域网格总数为 140 万.

计算时采用的边界条件为:假定进口参数均匀分布,入口总温 800 K ,进口边界为给定质量流量 110 kg/s ;外场(约为尾喷口当量直径的 20 倍)边界给定为环境压力,其他变量按流向偏导数为零处理. 排气系统内部各部件设定为流-固耦合面,固体壁面采用无滑移固壁边界条件,所有壁面发射率均设为 0.8;假定喷管入口气体为完全燃烧的燃气,基于燃烧理论,确定主流进口处氮气、二氧化碳和水蒸气质量百分比分别为 0.706, 0.209 和 0.085;外场边界及挡板间进口中引射的气体均为空气,成分为氮气和氧气,其质量百分比为 0.756 和 0.244.

采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁区采用壁面函数法进行处理,并选用离散坐标辐射模型(DO 模型)模拟实际换热过程中的辐射换热. DO 模型的设定为 2×4 ,将 4 个象限各自划分为 2 等份,然后将天顶角及圆周角各自划分为 2 等份共计 32 等份进行计算. 计算得到壁面 y^+ 在 55 左右.

2.2 红外辐射计算

红外辐射特性计算采用正反光线追踪法^[11-12]. 在半球范围内把空间探测角离散成 $N=120 \times 180$ 条光线,在其传递方向上分为 n 层,分别求解每一层介质的光谱辐射亮度以及对于探测点的贡献,从而确定排气尾焰和喷管壁面到达探

测点的辐射照度. 在计算中, 忽略了喷管外壁面的红外辐射(往往被机身遮挡), 只考虑喷管内壁面和遮挡板组成的固体辐射, 以及喷管内气体和尾喷流的红外辐射.

红外辐射的方位探测点分布如图2所示, 以喷管入口平面的中心点为圆点, 正后向(0°)为喷管轴线方向, 探测距离为 $100D$. 考虑到对称性, 水平面(XOZ 平面)的探测角为 $0^\circ \sim 90^\circ$; 铅垂面(YOZ 平面)的探测角为 $-90^\circ \sim 90^\circ$. 本文所计算红外辐射强度光谱范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$.

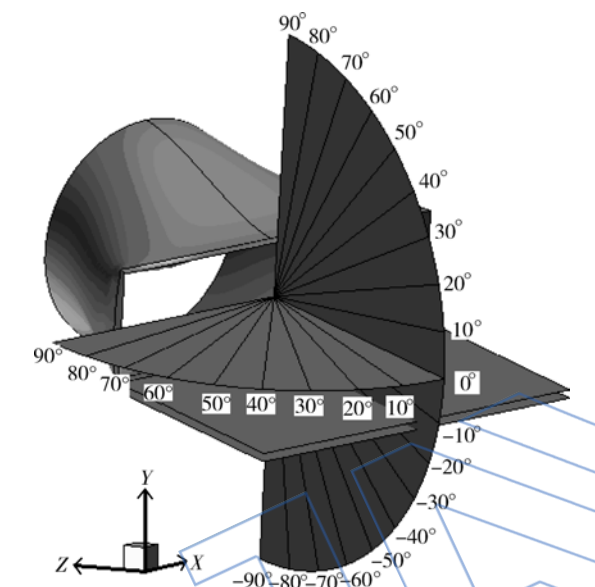


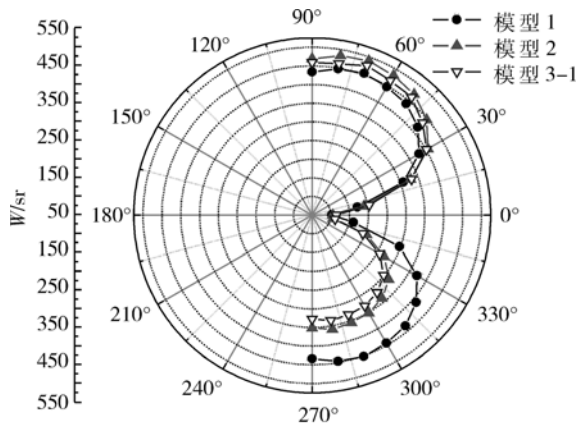
图2 探测位置分布平面

Fig. 2 Distribution of detecting point

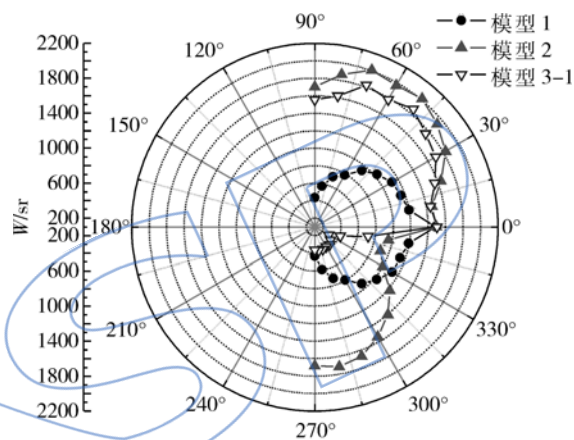
3 计算结果与分析

3.1 加装遮挡板的影响

图3为模型1, 2和3在铅垂面不同方位上的红外辐射强度分布. 下遮挡板的存在, 减少了二元喷口下方的射流与外界气流掺混的边界, 使尾焰的核心区温度略有升高, 同时遮挡板受到高温尾焰的冲刷作用而形成热区, 导致模型2在大部分方位上的总体辐射显著增加, 只有在侧下方 $0^\circ \sim -30^\circ$ 范围内下遮挡板可以对喷管腔体内的高温部件进行遮挡, 能够起到红外辐射抑制的作用. 模型3由于双层遮挡板的外侧遮挡板对内侧遮挡板的红外辐射起到了有效的遮挡作用, 从而使得铅垂面下方探测的总体红外辐射强度较基准喷管有了较大幅度的降低. 因此双层遮挡结构对红外辐射的抑制作用优于单层遮挡结构.



(a) 尾焰辐射



(b) 总体辐射

图3 模型1, 2, 3在YOZ平面上的红外辐射强度对比

Fig. 3 Infrared radiation intensity comparison for model 1, model 2 and model 3 in YOZ plane

3.2 挡板夹层内引射\强迫注气的影响

图4是采用双层遮挡板, 在遮挡板间距 10 mm 时, 在夹层通道内引射\强迫注气方式对铅垂面YOZ不同方位上红外辐射强度的影响. 当双层遮挡板夹层内有冷却气流流过时, 不仅对于铅垂面下方的总体红外辐射强度具有显著的抑制效果, 同时对于上方遮挡板也具有一定的冷却而使得上方的总体红外辐射较单层遮挡板有较大幅度的降低. 另外注入的冷气对尾焰也起到掺混降温的作用而使得下方探测的尾焰红外辐射强度降低, 在该遮挡板夹层间距下, 自然引射状态时的引射流量比约为 0.3% , 与按主流 0.3% 的强迫注气冷却效果基本相当. 因此, 按主流 1% 的强迫注气冷却对总体红外辐射的抑制效果更为显著.

图5采用双层遮挡板, 在遮挡板间距分别为 25 mm 和 30 mm , 且夹层通道内流过不同流量冷却气流对铅垂面YOZ不同方位上总体红外辐射

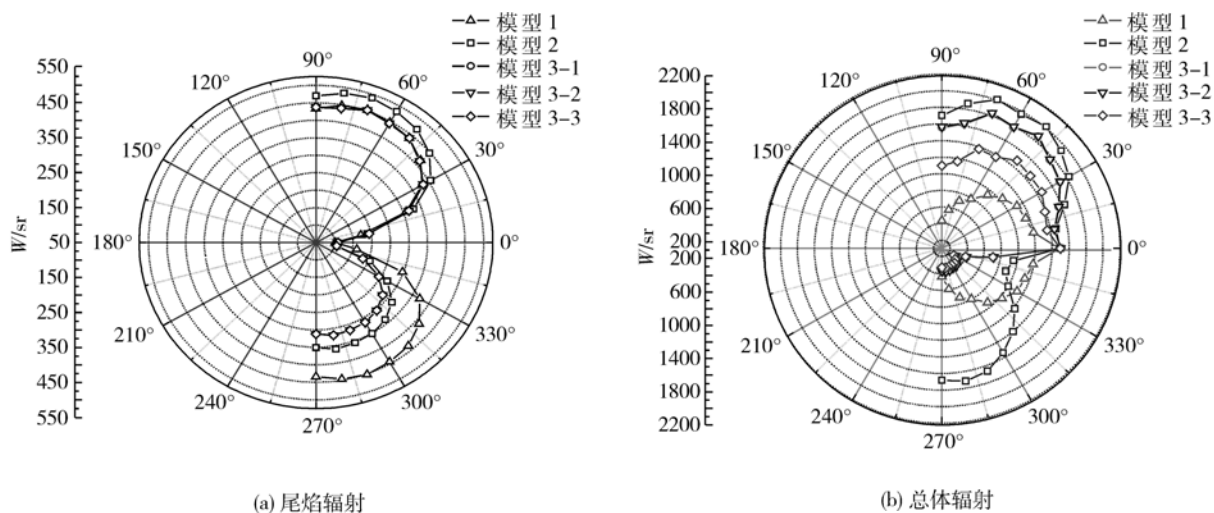


图4 模型3在YOZ平面上的红外辐射强度分布

Fig. 4 Infrared radiation intensity for model 3 in YOZ plane

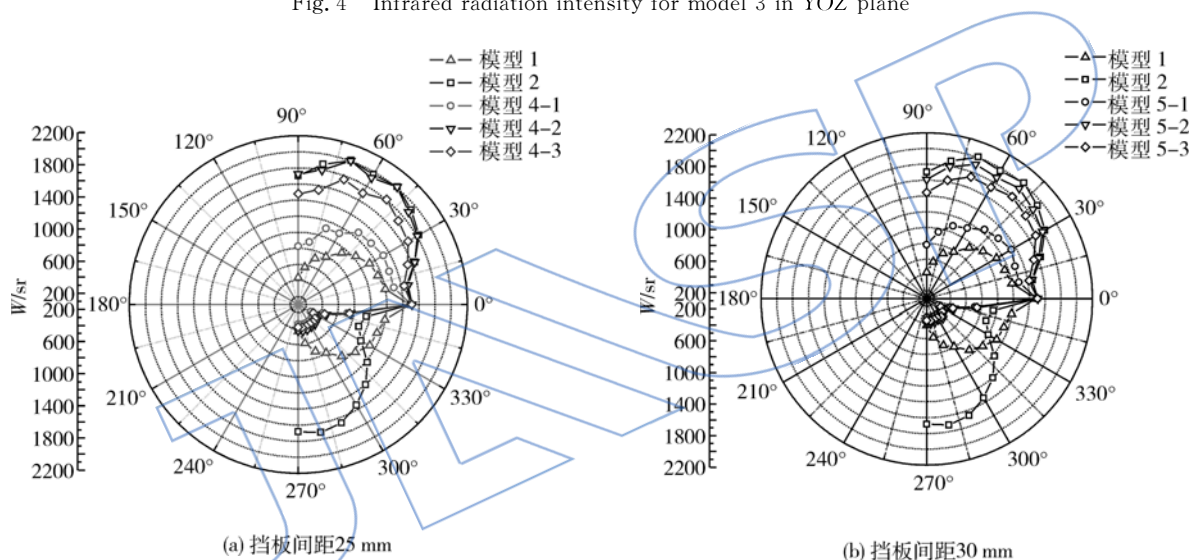


图5 模型4和模型5在YOZ平面上的红外辐射强度分布

Fig. 5 Infrared radiation intensity for model 4 and model 5 in YOZ plane

强度的影响. 在该遮挡板夹层间距下, 自然引射状态时的引射流量比约为 1.06% 与 1.2%, 对总体红外辐射的抑制效果较为显著. 同时, 由于强迫注气冷却时的冷却气流流量是恒定的, 遮挡板夹层间距增大后, 冷却气流流动速度下降, 对遮挡板的冷却效果反而降低, 与模型 3 相比, 在相同的状态下总体红外辐射强度有所增强. 加双层遮挡板后, 挡板夹层内引射/强迫注气方式在铅垂面 $-90^\circ \sim -20^\circ$ 方向探测的尾焰红外辐射强度相对基准喷管减少了 30% 左右, 总体红外辐射则显著减小, 最高可以达到 60% 左右. 但在铅垂面上方的总体红外辐射强度依然高出基准喷管 1 倍以上.

采用引射冷却方式, 红外辐射抑制的效果随着双层遮挡板夹层间距的增加而得到改善; 若采

用强迫注气冷却方式, 随着双层遮挡板夹层间距的增加, 夹层通道内引射的冷却气流流量有所增大, 对壁面的冷却效果起到了一定的改善 (如图 6 所示), 红外辐射抑制的效果随着双层遮挡板夹层间距的增加反而有所削弱.

3.3 上遮挡板开缝的影响

在双层遮挡板的上板上开设狭缝, 利用遮挡板夹层通道的引气形成气膜, 从而对上遮挡板表面进行冷却, 以达到降低壁面温度的目的.

图 7 为上遮挡板开缝后, 在自然引射状态下的壁面温度分布. 可见, 在上遮挡板上开设狭缝后, 挡板外露壁面的高温核心区面积减小, 壁面温度有较为明显的降低; 在狭缝上加入导流舌片后, 上挡板温度较简单狭缝有进一步的降低.

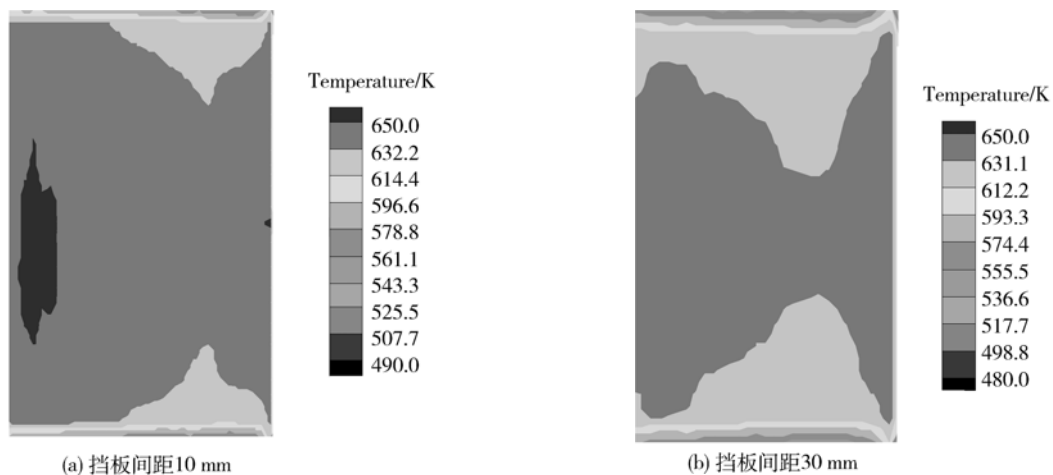


图6 引射冷却状况上遮挡板壁面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the upper shelter plate under ejector cooling

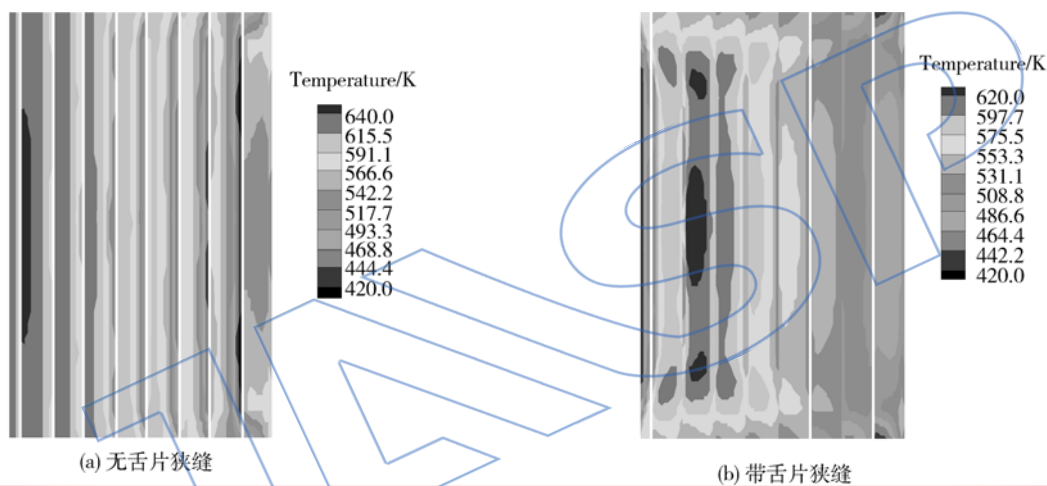


图7 引射冷却状况开缝上遮挡板壁面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on the upper shelter plate with slots under ejector cooling

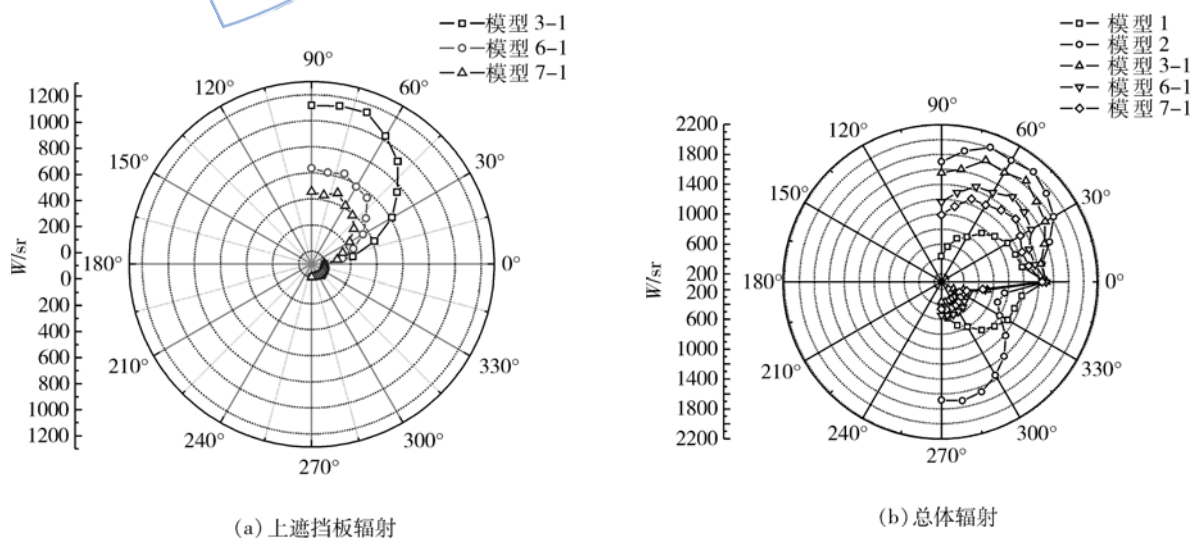


图8 模型6和模型7在YOZ平面上的红外辐射强度分布

Fig. 8 Infrared radiation intensity for model 6 and model 7 in YOZ plane

图8为加装双层遮挡板,间距10 mm并在上挡板开缝模型的红外辐射分布对比图。由图可见,模型6由于在挡板上开缝引入外界大气,上挡板温度降低,因此挡板红外辐射减小;模型7在挡板上开缝并加导流舌片后,总体红外辐射强度相比简单狭缝进一步减小。

4 结 论

1) 双层遮挡结构可以有效减小二元喷管铅垂面下方的红外辐射,但与此同时却增强了 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 方向的红外辐射。相对于单层遮挡板,随着遮挡间距的增大,铅垂面YOZ上 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 探测范围内上遮挡板红外辐射有所降低,尾焰辐射基本无变化,总体辐射最大可降低20%左右。

2) 采用引射冷却方式,红外辐射抑制的效果随着双层遮挡板夹层间距的增加而得到改善;若采用强迫注气冷却方式,在相同的注气质量流量下,红外辐射抑制的效果随着双层遮挡板夹层间距的增加反而有所削弱。

3) 在挡板上开缝后,由于外界大气引射对上挡板进行冷却,挡板温度降低,侧上方总体红外辐射相比未开缝最大有25%的衰减;在挡板上开缝并加导流舌片后,引射比达到1.45%,上遮挡板温度进一步降低,总体红外辐射相比简单狭缝最大有16%的削弱。

参考文献:

- [1] Chu C W, Wun W A. Simple 2D nozzle plume for IR analysis[R]. AIAA Paper 80-1808, 1980.
- [2] 郑礼宝, 张靖周. 矢量二元收扩喷管热射流复杂流场特征研究[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(2): 26-30.
ZHENG Libao, ZHANG Jingzhou. Investigation of hot-jet characteristics of 2-D C-D vectored nozzles[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(2): 26-30. (in Chinese)
- [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.
ZHENG Libao. Infrared emission from turbojet with two-dimensional nozzle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 140-142. (in Chinese)
- [4] 张勃, 吉洪湖. 大宽高比矩形喷管的射流与外流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 hot jet mixing with outflow characteristics of high aspect ratio C-D nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 104-110. (in Chinese)
- [5] 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实验[J]. 推进技术, 2007, 28(4): 394-398.
LUO Mingdong, JI Honghu, HUANG Wei, et al. Experiment on spectral infrared radiant characteristics of two-dimensional nozzles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(4): 394-398. (in Chinese)
- [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性实验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 122-128.
LUO Mingdong, JI Honghu, HUANG Wei, et al. Experiment on spectral infrared radiant characteristics of two-dimensional nozzles of turbofan engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 21(4): 122-128. (in Chinese)
- [7] 王宏亮, 张靖周, 单勇. 球型收敛调节片喷管红外特性数值研究[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1576-1582.
WANG Hongliang, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical study on infrared radiation characteristics of spherical convergent flap nozzles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1576-1582. (in Chinese)
- [8] ZHANG Kunyuan, ZHANG Rongxue, XU Hui. Investigation of single expansion ramp nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(5): 380-382.
- [9] 罗昕, 张靖周, 单勇, 等. 加遮挡板后二元喷管的红外辐射特性数值模拟[J]. 推进技术, 2008, 29(6): 696-700.
LUO Xin, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical simulation on the infrared radiation characteristics of two-dimensional nozzles with sheltering baffles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(6): 696-700. (in Chinese)
- [10] Pao S P, Carlson J R. Computational investigation of circular-to-rectangular transition ducts[J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(1): 95-100.
- [11] 单勇, 张靖周, 李立国. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 96-100.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou, LI Ligu. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(2): 96-100. (in Chinese)
- [12] SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation of flow mixture enhancement and infrared radiation shield by lobed forced mixer[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(18): 3687-3695.