

加遮挡板后二元喷管的红外辐射特性数值模拟^{*}

罗 昕, 张靖周, 单 勇, 徐 亮

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 在宽高比为 6.33 的圆转矩形二元喷管喷口处安装不同结构的下遮挡板。通过计算流体力学 / 红外辐射 (CFD / IR) 综合数值模拟的方法, 获得加遮挡结构后二元喷管的红外辐射场分布特征, 并对不同遮挡结构的红外辐射抑制效果进行比较。结果表明: 遮挡板结构改变了二元喷管原有的对称结构的辐射场分布。它对喷管的尾焰以及内外壁面产生的红外辐射在 $-90^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 方向上有着较好的抑制作用。尾焰红外辐射强度最多降低 51%, 喷管内壁面红外辐射被完全遮挡。而双层遮挡结构可以削弱二元喷管 $-90^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 方向 43% 的总体红外辐射, 与此同时却增强了 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 方向 40% 的红外辐射。

关键词: 二元喷管⁺; 红外辐射; 遮挡板⁺; 数值计算

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 06-0696-06

Numerical simulation on the infrared radiation characteristics of two-dimensional nozzles with sheltering baffles

LUO Xin, ZHANG Jing-zhou, SHAN Yong, XU Liang

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

Abstract Different sheltering baffle structures were installed at the exit of 2-D circular to rectangular nozzles. The ratio of the nozzle exit was 6.33. The infrared radiation field characteristic and the effect on the infrared radiation suppression of different sheltering baffle structures were studied and compared by CFD / IR numerical simulation. The results show that the symmetry radiation field distributions of 2-dimensional nozzles are changed by sheltering baffle. They suppress the infrared radiation of plume and interior solid wall from the angle -90° to 0° . Compared with the normal 2-D nozzle, the infrared radiation intensity of plume decreases with 51%. The nozzle interior wall radiation is sheltered completely. Two-layer sheltering baffle reduces 43% radiation intensity of 2-dimensional nozzles at the angle -90° to 0° . Meanwhile it increases 40% radiation intensity at the angle 0° to 90° .

Key words 2-dimensional nozzles⁺; Infrared radiation; Sheltering baffle⁺; Numerical calculation

1 引 言

非轴对称二元喷管可以增强射流与外流的掺混, 缩短尾喷流的高温核心区的长度, 能够有效地降低红外辐射特征信号^[1]。国内对二元喷管的气动和红外辐射特性开展了大量的实验与数值研究^[2~5], 表明采用大宽高比的二元喷管能够有效降低尾向光谱辐射强度的峰值, 但是也可能在部分方向增强以固体壁面辐射为主的光谱辐射强度, 因此, 为了在主要威胁方向上降低喷管在各个波段的光谱辐射强度, 必须将二

元喷管技术和其他红外抑制技术综合应用^[5]。美国“全球鹰”无人驾驶高空侦察机、F117等飞行器普遍采用二元喷口以减小其喷流红外辐射, 同时其后机身外延这一结构可以有效地遮挡发动机喷口及尾焰核心区在某些特定方位的红外信号, 相对于常规的二元喷管, 其尾焰和发动机喷口的红外辐射场分布规律必然发生改变; 另外遮挡结构与高温核心尾焰的直接接触将导致其自身的固体壁面辐射增强, 因此降低遮挡结构壁面的温度是这一措施取得综合红外辐射抑制效果的关键。针对这些问题, 有必要开展针对加遮挡

* 收稿日期: 2007-10-23 修订日期: 2008-04-15

作者简介: 罗 昕 (1982—), 男, 硕士生, 研究领域为传热与红外隐身。Email: k1108898@sina.com

结构后二元喷管红外辐射特征和红外抑制效果的研究工作。

本文以出口截面宽高比为 6.33 的二元喷管为模型,在其喷口下沿安装三种不同结构的遮挡板。通过对高温尾焰所产生的红外辐射进行直接遮挡,运用基于计算流体力学/红外辐射 (CFD/IR) 综合数值模拟的方法,揭示加遮挡结构后二元喷管的红外辐射场分布特征,并对不同遮挡结构的红外辐射抑制效果进行比较。

2 物理模型和计算方法

本文在建立圆转矩形的二元喷管模型 CR0(图 1(a))时,过渡型面采用了超椭圆方程 $(Z/a)^n + (Y/b)^n = 1$ 计算得到,过渡型面的约束条件为等截面积的圆转矩形。喷管进口是直径为 12.863 cm 的圆形截面,出口为宽 (W) 28.682 cm,高 (H) 4.53 cm 的矩形截面,宽高比 $AR = W/H = 6.33$ 。喷管总体长度为 12.863 cm,从进口至出口保持截面的面积均为 129.941 cm^2 。由于出口为矩形,定义供比较参考的基准直径 $D^* = \sqrt{4A/\pi} = 12.863 \text{ cm}$, A 为喷管出口面积^[3]。

喷口处安装下遮挡板是将喷管下缘沿射流方向延长 $L = 14.341 \text{ cm}$ ($L/W = 0.5$) 而形成的(图 1(b)),记作 Flip1。双层下遮挡板的结构是指在原单层遮挡板的正下方放置一块面积大小与其相同的遮挡板,间距 S 取 5 mm,记为 Flip2-5(图 1(c))。另外,若将原单层遮挡板向下方平移 5 mm,则形成如图 1(d)这种结构,记作 Flip1-5。

考虑到计算模型的对称性,故取 1/2 区域进行计算,对称面为 XOZ 面。由于要计算喷口尾焰的红外辐射强度,在喷管模型外建立一个很大的远场区域,计算区域在 X 方向为 $4D^*$, Y 方向为 $5D^*$, Z 方向为 $10D^*$,如图 2 所示。

进行 CFD 计算时所采用的边界条件为:喷管进口总温 600 K,总压 151.987 5 kPa,环境大气温度为 300 K,压力 101.325 kPa,压力出口设置在喷口下游

很大的区域边界上。采用 Fluent 软件进行计算,使用隐式非耦合算法,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,壁面附近采用标准壁面函数进行修正。

红外辐射特性计算则采用逆向蒙特卡罗法 (RMC)^[7,8] 和窄谱带模型法^[9,10]。就气体辐射而言,其辐射吸收、发射具有容积参与性和光谱选择性。红外辐射强度主要取决于燃气中 CO_2 , H_2O 等组分的温度、压力和浓度等参数的分布和大小。由于其发射与吸收在整个容积内完成,能量辐射没有固定的物理边界。固体壁面有其物理边界,能量发出的起点在表面上,终止于其它表面,被吸收、反射或直接逸出计算模型所设定的尾焰气体边界。定义固体表面辐射边界条件

$$L_{\sigma,i}(0) = \epsilon_i L_{b,\sigma}(T_i) + \frac{1 - \epsilon_i}{\pi} H_{\sigma,i}$$

式中右脚下标 σ 表示波数,即波长的倒数;右边第一项为壁面 i 的自身辐射的光谱辐射亮度;第二项为壁面 i 对入射辐射以漫反射形式向半球空间反射出的光谱辐射亮度。计算程序中将喷管模型简化为发射率 $\epsilon = 0.8$ 的灰体。

由于红外辐射主要来源于尾喷管热射流和固体壁面,因此在红外辐射计算程序中,计算了各喷管的尾焰、内壁面、外壁面在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 方向上 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的红外辐射强度 (0° 为正对排气喷口方向),并且将结果分别输出进行单独比较。具体计算方法详见文献[11,12]。因为将探测目标作为点源处理,因此其辐射强度 I 表示目标在单位时间向特定方向单位立体角内辐射的能量,单位为 W/Sr 。

3 计算结果与讨论

3.1 下遮挡板对下游流场的影响

图 3 是 CRQ Flip1 和 Flip2-5 三种喷管窄对称面上的射流速度等值线分布。可以看到由于下挡板的影响,原先流体在下游的对称发展趋势受到限制。Flip1 与 Flip2-5 的喷口下游处在 XOZ 平面两侧的速度分布不再像 CR0 那样对称。

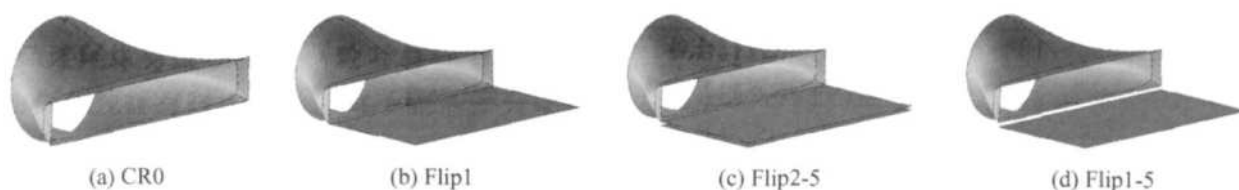


Fig. 1 Nozzle models

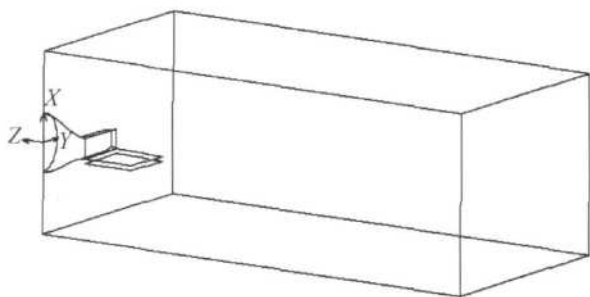


Fig. 2 Computational area

图4是在喷管下游挡板边界位置的 XOY 截面上的速度矢量分布。圆转矩形喷管的喷口处能通过卷吸作用将冷空气次流与主流进行掺混(图4(a))。喷口处加了下挡板后,上端的卷吸作用仍存在,但是下端的卷吸作用被破坏(图4(b),图4(c))。

3.2 CR0与Flip1的红外辐射强度之比较

图5是CR0和Flip1结构喷管在 XOZ 平面上方 $0^\circ \sim 90^\circ$ 以及下方 $0^\circ \sim -90^\circ$ (图中对应 $360^\circ \sim 270^\circ$)探测方向上,排气尾焰 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度对比。喷管CR0的尾焰红外辐射具有倒梨形包络分布,喷口尾焰辐射强度最大处出现在 $\pm 10^\circ$ 附近,且对称分布。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向上,Flip1喷管的红外辐射分布与CR0基本相同,但是挡板的存在,减少了

二元喷管出口下方的射流与外界气流掺混的边界,导致尾焰的核心区温度较高,因此在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向上尾焰辐射强度约有 $10\% \sim 20\%$ 的提高;在 $0^\circ \sim -90^\circ$ 范围内,由于挡板对核心尾焰区的遮挡,在 $-10^\circ \sim -90^\circ$ 减少了 $24\% \sim 42\%$ 的红外辐射,可见挡板对下方的尾焰红外辐射起到很好的遮挡作用。

由于挡板与高温尾焰直接接触,受热后挡板会产生大量的红外辐射,数值模拟结果表明挡板使得喷管的总体辐射增加了 $2 \sim 3$ 倍(图6)。因此Flip1喷管的挡板虽然能够对抑制尾焰的红外辐射起到积极的作用,但是其自身受热所产生的红外辐射量远超所能抑制的辐射量。这种单层挡板结构并不能起到很好的总体红外抑制作用。

3.3 Flip1-5与Flip2-5喷管的红外辐射分布

为了消除由于挡板高温壁面引起的红外辐射,设计了Flip2-5双层挡板结构。可以设想:下挡板会对上挡板高温产生的红外辐射产生一定的遮挡效果,但是在 $90^\circ \sim 0^\circ$ 范围内不起任何作用。考虑充分利用喷口热排气动能引射外界环境冷气,设计Flip1-5这种结构:如图7所示,外界环境冷气一部分从挡板与喷管出口间的这 5 mm 缝隙中通过,冷却上挡板上表面;一部分流经挡板下表面,这样遮

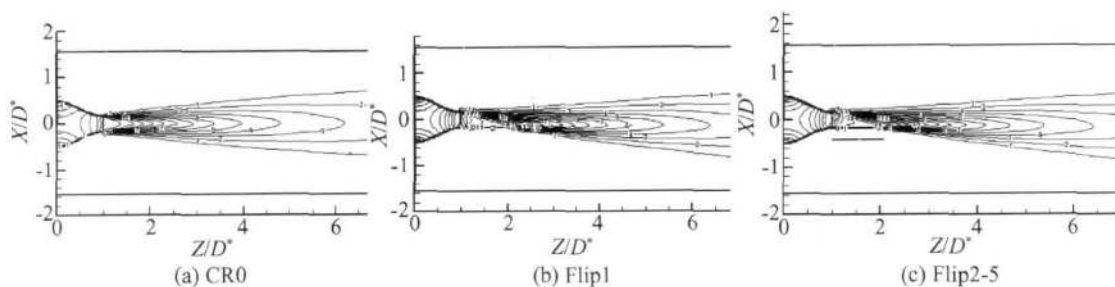
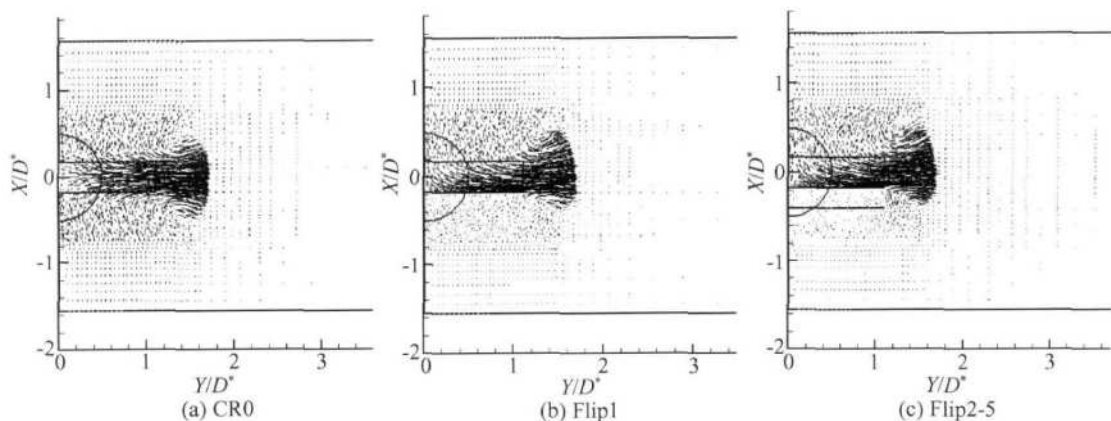
Fig. 3 Velocity contour at XOZ section

Fig. 4 Velocity vector at one-dimensional section from nozzle exits

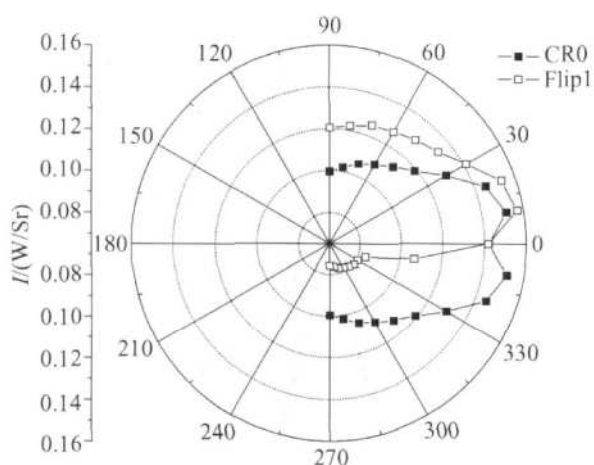


Fig. 5 Plume infrared radiation intensity for CR0 and Flip1

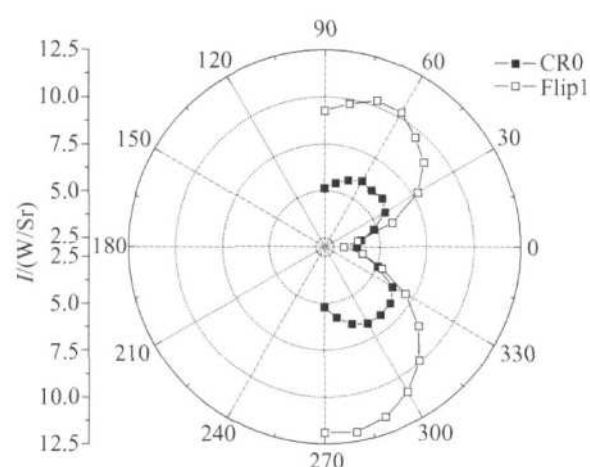


Fig. 6 Total infrared radiation intensity for CR0 and Flip1

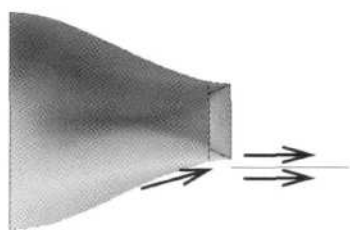


Fig. 7 Scheme of cold airflow of Flip1-5

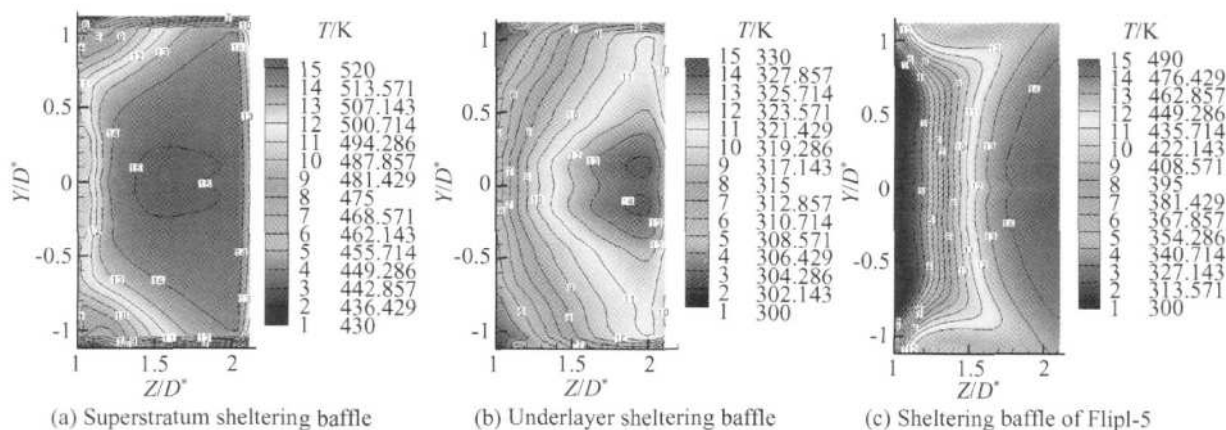


Fig. 8 Temperature section of sheltering baffle

挡板的上下表面均与一定量的冷却气流相接触从而达到降温的作用。

图 8(a) 的温度等值线显示, Flip2-5 上层遮挡板的大块区域温度在 500 K 左右, 只是在遮挡板前缘和窄边边缘温度有所降低。说明在双层遮挡板中有一定量的外界冷气进入, 但是对降低上遮挡板温度起不到显著作用。图 8(b) 是下挡板在高温上挡板的影响下的温度分布。与 Flip2-5 相比, Flip1-5 遮挡板的大块区域温度都有较明显地降低, 尤其是其前缘温度与环境温度几乎相同 (图 8(c))。说明上下表面均有一定量外界环境冷气通过, 不仅使遮挡板整体温度降低, 而且流经上表面的冷气对降低热排气温度有益。

如图 9 所示, Flip1-5 与 Flip2-5 喷管模型的尾焰红外辐射强度, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的方向上, 其分布与 CR0 基本相同, 但是辐射强度略有提高。在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 的方向上, Flip1-5 喷管由于尾焰能够直接与引入的冷气流掺混, 所以尾焰温度迅速降低, 辐射强度最低。在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 范围内, 由于双层遮挡或者被冷气流包裹着的单层遮挡板对核心尾焰区的遮挡, 红外辐射最多在 -15° 附近减少了约 51%, Flip1-5 喷管对尾焰的红外抑制效果更佳。

喷管外壁面 (包含了遮挡板引起的外表面增加的部分) 的红外辐射强度大小分布见图 10。Flip1-5 结构的遮挡板尽管有冷却气流包围 (图 7), 但是与尾焰直接接触导致壁面温度较高而发出的红外辐射量仍增强了外壁面的红外辐射强度。如果采用双层遮挡板结构 Flip2-5, 下层遮挡板对上层高温遮挡板起到遮挡作用。双层遮挡板结构在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 范围内相对于单层遮挡板可以降低 30% 的红外辐射强度。

喷管内壁面 (包含了遮挡板引起的内表面增加的部分) 的红外辐射强度大小分布如图 11 所示。图

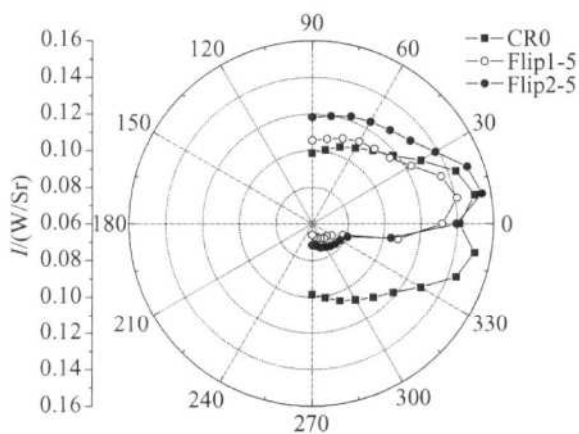


Fig. 9 Plume infrared radiation intensity for Flip1-5 and Flip2-5

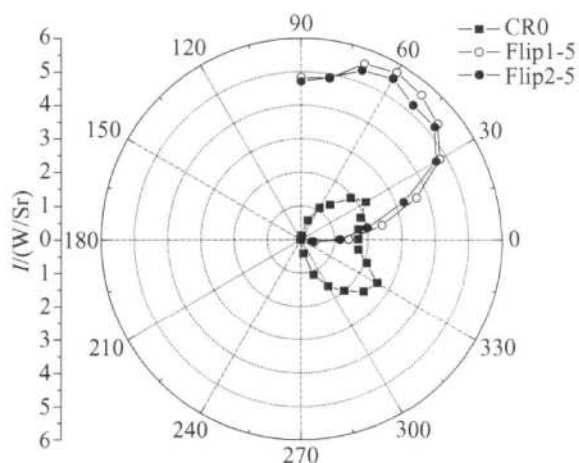


Fig. 11 Infrared radiation intensity of interior wall for Flip1-5 and Flip2-5

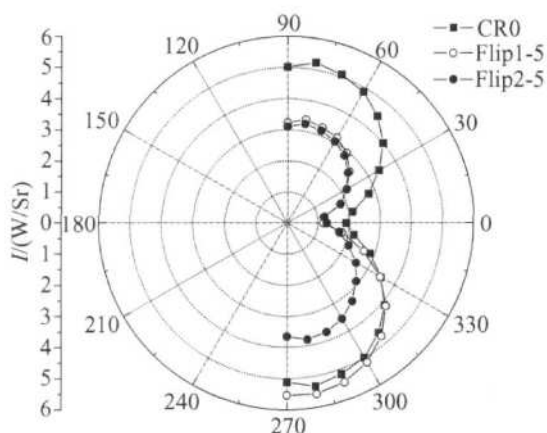


Fig. 10 Infrared radiation intensity of exterior wall for Flip1-5 and Flip2-5

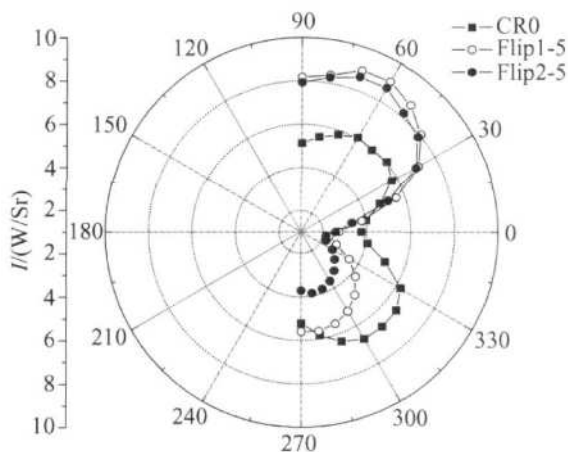


Fig. 12 Total infrared radiation intensity for Flip1-5 and Flip2-5

中的 CR0 喷管由于无直接遮挡, 内壁面的红外辐射在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内对称分布。无论是有单层遮挡板还是双层遮挡板存在时, 遮挡板将 $-90^\circ \sim -15^\circ$ 探测范围内的喷管内壁面红外辐射几乎完全遮蔽, 但是在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的方向上红外辐射比 CR0 有所增强, 红外辐射的增加是由于遮挡板上表面的辐射造成的, 所以怎样通过气膜冷却的方式降低遮挡板表面温度仍是遮挡问题下一步的研究重点。

将尾焰、外壁面和内壁面的红外辐射强度相加得到喷管模型的总体红外辐射强度分布 (图 12)。可以看到在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 方向上, Flip1-5 尤其是 Flip2-5 喷管的红外辐射较 CR0 降低很多。但是在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向上, 受挡板辐射的影响, Flip1-5 和 Flip2-5 喷管总体红外辐射强度要比 CR0 高。

4 结 论

(1) 不同结构的遮挡板均对喷管的排气尾焰红外辐射在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 方向上有着较好的抑制效果。对于没有引射外界冷气的遮挡结构, 在 $-10^\circ \sim -90^\circ$ 方

向红外辐射减少了 24% ~ 42%; 对于有外界环境冷气引射进入的结构, 其尾焰红外辐射最大减少了 51%。

(2) 单层遮挡板自身产生的红外辐射会增加喷管外壁面的红外辐射强度。而双层遮挡板结构可以有效地减小 30% 的单层遮挡板在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 方向的红外辐射。

(3) 不同结构的遮挡板, 对 $-90^\circ \sim -15^\circ$ 方向的内壁面红外辐射则完全遮蔽, 但增强了 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的固体壁面辐射。

(4) 遮挡板结构完全改变了二元喷管原有的对称结构的辐射场分布。双层遮挡结构可以削弱二元喷管 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 方向 43% 的红外辐射, 但与此同时却增强了 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向 40% 的红外辐射, 因此怎样通过气膜冷却方法有效组织引射气流降低遮挡板内表面温度是下一步研究的重点。

(下转第 732 页)

5 结 论

本文介绍了一种研究推力室传热特性的壁面测温方法,并与国内传感器公司合作研制了较为廉价的带隔离模块的凯装式热电偶温度传感器。介绍了计算内壁温和热流值的数值处理方法,并进行了主要误差分析,结果表明误差在工程允许范围内。将该方法运用于气气同轴喷注器热试车,获得了其喷注面板及沿身部轴向上的内壁温度和热流值及分布规律。但该方法对温度传感器的要求较高,现阶段国内只能通过定制,且国内制造工艺不成熟,很难以使所有传感器获得一致的特性参数;传感器在推力室上的安装不方便等;这些不足将在以后加以改进。

参考文献:

- [1] William M Marshall, Sibtosch Pal, Roger D Woodward, et al. Benchmark wall heat flux data for a GO_2/CH_2 single element combustor[R]. *AAA* 2005-3572

- [2] Calhoon D, Ito J, Kors D. Investigation of gaseous propellant combustion and associated injector-chamber design guide-lines[R]. *NASA CR-121234* 1973
- [3] Frohlich A, popp M, Schmidt G, et al. Heat transfer characteristics of H_2/O_2 -combustion chambers[R]. *AAA* 93-1826
- [4] Immich H, Kretschmer J, Preclik D, et al. Thrust chamber technology developments for future launch vehicle liquid rocket engines[R]. *AAA* 2001-3544
- [5] Foust M J, Deshpande M, Pal S, et al. Experimental and analytical characterization of a shear coaxial combustor GO_2/CH_2 flow field[R]. *AAA* 96-0646
- [6] 郭爱芳 主编. 传感器原理与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001

(编辑: 刘梦威)

(上接第 700 页)

参考文献:

- [1] Lozanova M, Stantov P. Experimental investigation on the similarity of a 3D rectangular turbulent jet [J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 24: 470~478
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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). (LUO Ming-dong, JI Hong-hu, 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).)
- [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). (LUO Ming-dong, JI Hong-hu, HUANG Wei et al. Experiment on spectral infrared radiant characteristics of two-dimensional nozzles of turbofan engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(4).)
- [6] Pao S P, Carlson J R. Computational investigation of cir-

cular-to-rectangular transition ducts [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1994, 10(1): 95~100

- [7] Michael F. Modest. backward Monte Carlo simulations in radiative heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(1): 57~62
- [8] LU Xiao-dong, Hsu Pei-feng. Reverse Monte Carlo method for transient radiative transfer in participating media [C]. *ASME International Mechanical Engineering Congress, Washington D. C., November 15~21, 2003* MECE 2003-41932
- [9] 余其铮. 辐射换热原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000
- [10] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. *NASA SP-308Q* 1973
- [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计算和实验验证 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 96~100
- [12] 单 勇, 张靖周. 模化比对直升机用红外抑制器红外辐射特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 221~226

(编辑: 刘梦威)