

三种典型流动状态下的喷流红外辐射特性

朱希娟, 李霞, 王俊, 刘兴润

(光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 计算了欠膨胀状态、设计状态和过膨胀状态三种典型流动状态下的轴对称收扩喷管在 3-5 μm 波段的喷流红外辐射传输特性, 并对三种状态的计算结果进行了分析比较。流场采用有限体积法和重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型求解 N-S 方程得到, 喷流的红外辐射强度采用有限体积法结合窄带模型求解吸收发射性介质辐射传输方程得到。计算结果显示: 欠膨胀状态的喷流红外辐射强度最大, 设计状态与过膨胀状态的喷流红外辐射依次降低, 随天顶角的增大差距增大, 这与喷流的流动特点有关, 说明喷流流动特点的改变影响红外辐射的大小, 通过控制喷流的流动可以控制喷流红外辐射强度。

关键词: 典型流动状态; 喷流; 红外辐射; 窄带模型; 有限体积法

中图分类号: V231.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)04-0850-06

Infrared radiation of plume in three typical flow state

Zhu Xijuan, Li Xia, Wang Jun, Liu Xingrun

(Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: The infrared radiation in 3-5 μm band of axisymmetric Laval nozzle in underexpanding, designing and overexpanding conditions were simulated by a three-dimensional (3-D) exhaust system infrared radiation code. The 3-D flow field of the jet was simulated numerically by finite volume method(FVM), RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, and the infrared (IR) radiation code of the plume was developed by FVM coupled with narrow band model in non-gray absorbing-emitting media. The results indicate that the plume IR radiation intensities of underexpanding state are maximal, those of the designing and overexpanding decrease in turn, which related to flow characteristics, it illuminates that the IR radiation of plume can be affected by the flow characteristics, that can be controlled by controlling the flow.

Key words: typical flow state; plume; infrared radiation; narrow band mode; finite volume method

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-09

基金项目: 国防重点实验室基金(9140C610405120C61231)

作者简介: 朱希娟(1981-), 女, 博士, 主要从事气体辐射特性及传输方面的研究。Email: zxj811129@163.com

0 引 言

随着红外探测技术的不断发展,空中军事目标面临着日益严重的红外威胁,要提高军事目标的生存能力,就必须对其红外辐射特性进行深入研究。排气系统是飞行器红外辐射的主要来源,因此对排气系统的红外辐射特性进行数值模拟研究是十分必要的。

近年来,我国也有一些研究人员通过各种方法求解了喷流的红外辐射特性。徐南荣^[1]计算了航空发动机喷气流红外辐射随波长的分布特性,得到辐射传输方程中的积分解并将其转换为有限增量的形式。詹光和李春萱^[2]计算了多组分纯气相发动机喷流 1.5~5.0 μm 波段间红外辐射特性。董世奎^[3]等在贴体坐标系下利用离散坐标法计算了尾喷流辐射特性。郝金波^[4]等计算固体火箭发动机的尾喷流红外辐射特性。

喷流的红外辐射特性与喷流温度场、压力场及组分分布息息相关,在之前的工作中分析了脉冲射流和微射流强化混合对喷流流动产生的影响^[5-6]。为了进一步深入研究喷流流动状态对其红外辐射特性的影响,文中在喷流流场的数值模拟中使用有限体积法求解 N-S 方程,采用 RNGk-ε 二方程湍流模型描述喷流,辐射场采用有限体积法^[7]结合窄带模型求解,计算了欠膨胀状态、设计状态和过膨胀状态三种典型状态下喷流的红外辐射特性,并对计算结果进行了对比分析。

1 数值模拟方法

模拟对象有设计落压比 $NPR_{des}=4, 5, 6$ (落压比 $NPR=p_t/p_a$; 其中, p_t 为入口总压的轴对称收扩喷管,如图 1 所示。 p_a 为环境静压) $NPR_{des}=5$ 的喷管入口直

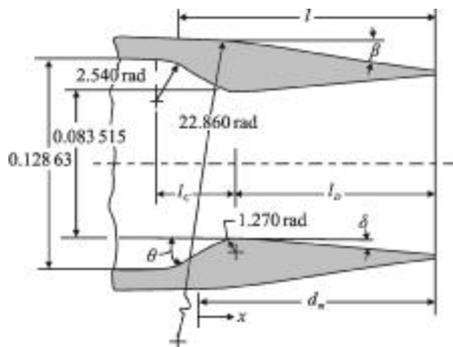
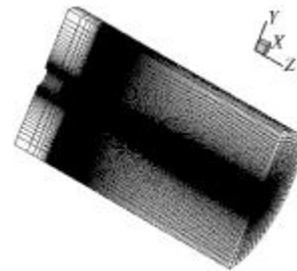


图 1 轴对称收扩喷管几何结构图
Fig.1 Nozzle geometry

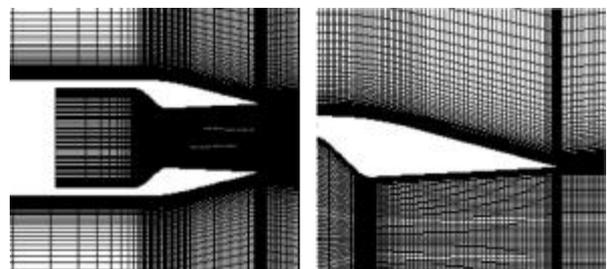
径 0.128 63 m,喉道直径为 0.083 515 m,出口面积与喉道面积比为 1.35,详细参数见参考文献^[8]; $NPR_{des}=4.0$ 和 6.0 的两个轴对称收扩喷管喉道前尺寸与 $NPR_{des}=5$ 的喷管相同,出口面积与喉道面积比分别为 1.22 和 1.47。

1.1 流场的计算方法

在喷管流场的计算通过自编程序得到,程序使用有限体积法求解定常可压缩流 N-S 方程,采用 RNGk-ε 二方程湍流模型描述喷流,流场计算网格数为 1 002 496,如图 2(a)~(c)所示。通过计算得到喷流的温度场、压力场及组分场作为红外辐射计算的输入数据。



(a) 1/2 流场计算网格
(a) 1/2 flow field mesh



(b) 喷管截面放大图 (c) 喷管出口截面放大图
(b) Enlarged view of nozzle (c) Enlarged view of nozzle exit

图 2 流场计算网格

Fig.2 Mesh of flow filed

1.2 红外辐射强度的计算方法

吸收-发射性介质的辐射传输方程为:

$$\frac{dL_{\eta}^m(s)}{ds} = k_{\eta}(s)[J_{\eta}(s) - L_{\eta}^m(s)] \quad (1)$$

式中:上标 m 表示第 m 个立体角;下标 η 表示第 η 个波数段;等式左侧表示沿 r^m 方向的单色辐射亮度在 ds 路径上的变化率; k_η(s) 表示位置 s 处的单色吸收系数; J_η(s) 为源函数,表示位置 s 处的气体发射的单色辐射亮度; L_η^m(s) 表示位置 s 处气体吸收的单色辐射亮度。

图 3 给出了空间离散下某一个控制体的示意图,其中图(a)为 H 型网格的控制体示意图,图(b)为 O 型网格的控制体示意图。图 4 为立体角的离散方式, θ 为天顶角, ϕ 为方位角,天顶角与立体角为均匀离散。

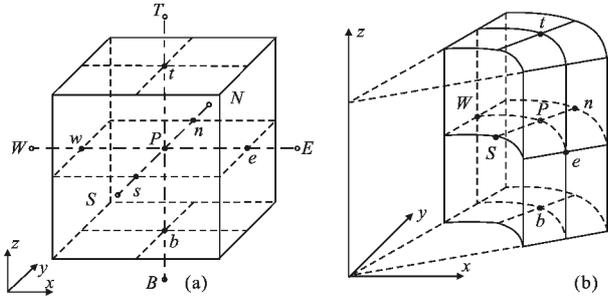


图 3 空间离散方式

Fig.3 Schematic of 3-D control volume

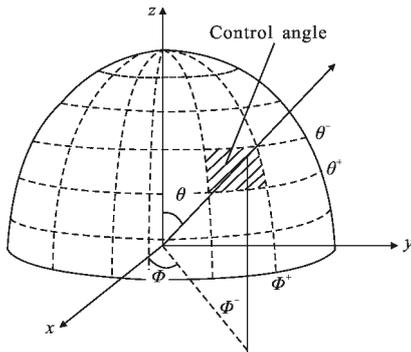
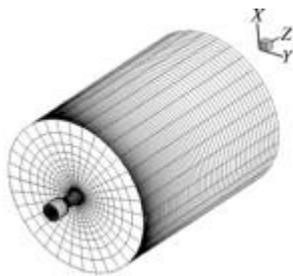


图 4 立体角离散方式

Fig.4 Schematic of discrete control angle

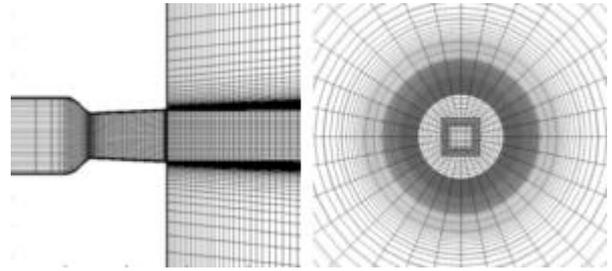
吸收发射性介质主要考虑 CO_2 和 H_2O , 其光谱吸收系数通过 HITEMP 数据库结合 Young 数值平均法计算得到^[9],采用有限体积法离散辐射传输方程,最后通过 CGSTAB 方法^[10]求解离散辐射传输方程组。

辐射场计算网格数为 250624(见图 3),角度离散为 100×200 ,天顶角和方位角划分方式如图 5(a)~(c)所示。



(a) 全场计算网格

(a) Mesh of whole field



(b) 喷管截面放大图

(c) 喷管出口截面放大图

(b) Enlarged view of nozzle (c) Enlarged view of nozzle exit

图 5 红外辐射计算网格

Fig.5 Mesh of infrared radiation

2 计算结果分析

3 个喷管的计算条件相同:入口总压为 $5.0 \times 10^5 \text{ Pa}$,入口总温 1100 K ,外流马赫数 $\text{Ma}_\infty=1.5$,远场压力为 101325 Pa ,喷流红外辐射计算波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

(1) $\text{NPR}_{\text{des}}=4$ 的喷管

图 6 中,图(a)~(b)给出了 $\text{NPR}_{\text{des}}=4$ 喷管流场计算的温度、压力分布图。图(b)所示为喷管出口压力过高,呈现欠膨胀状态,从喷口出来后继续膨胀,压力膨胀过低后经过斜激波压力(温度)迅速升高,然后再继续膨胀,膨胀过低后再经过斜激波,压力(温度)又迅速升高,这样往复直到压力与环境压力平衡,形成了多个高温区。

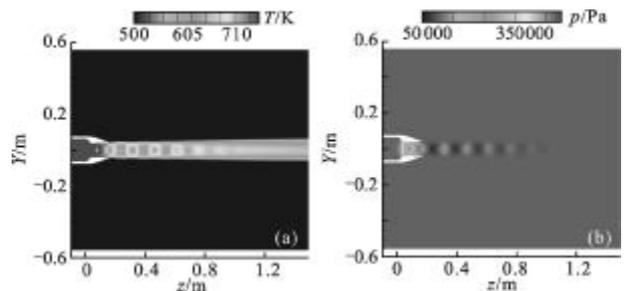


图 6 流场计算结果

Fig.6 Flow field of plume

图 7(a)给出了 $\text{NPR}_{\text{des}}=4$ 的天顶角为 0° 方向的喷流红外辐射亮度云图;图 7(b)给出了天顶角为 0° 方向的中心线上喷流的红外辐射亮度值。可以看出,喷流辐射亮度沿该方向不断衰减,但在 $Z=0.3 \sim 0.9$ 之间有所起伏。高温喷流出口的辐射亮度由 $870 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 剧烈衰减到 $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,在 0.3 m 附近辐射亮度由衰减变为增强,到 0.35 m 处达到顶点然后再剧烈衰减,这样经历 5 次波动最后在 1.5 m 位置衰减到 $450 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

这是由于入射的辐射比较强,温度的突然下降导致喷流吸收作用占主导,此时大温度梯度使辐射亮度剧烈衰减,在 0.3 m 附近辐射亮度又遇到温度突然升高,此时气体自身发射作用占主导,从而导致辐射亮度有急剧升高,在 0.35 附近达到顶点,从图 6 中可以看到,辐射亮度的波峰波谷相比温度的稍有延后的现象。

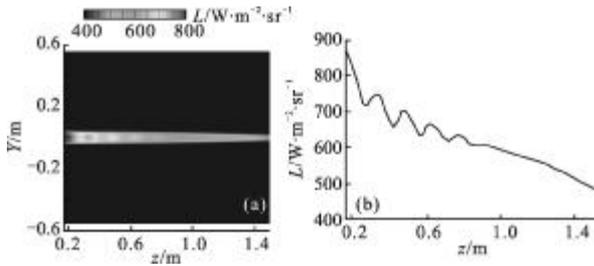


图 7 天顶角 0°方向的喷流红外辐射亮度

Fig.7 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 0°

图 8(a)为天顶角 90°、方位角 0°方向喷流红外辐射亮度分布云图;图 8 (b)为从 90°方位角观察该方向喷流红外辐射亮度传输云图。天顶角 90°方向的喷流红外辐射不受喷管内和喷管出口高温气体的影响而只受喷流气体参数的影响。

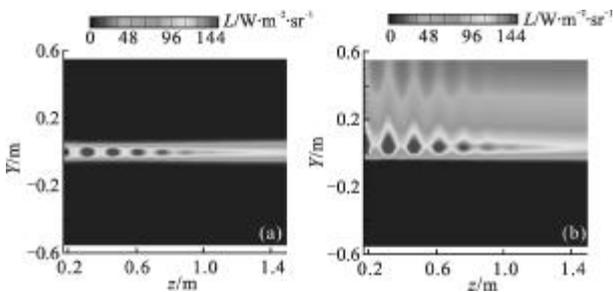


图 8 天顶角 90°方向喷流红外辐射亮度分布云图

Fig.8 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 90°

图 8(a)中,每个高辐射区是由该区域高温 CO₂ 和 H₂O 气体辐射造成的;由图 8(b)可见,轴向距离为 0.33 处的结果显示在径向 0~0.15 m 都有很强的辐射,大概 170 W/(m²·sr)左右,在 0.15 m 附近突然剧烈衰减,到 0.2m 衰减为 90 W/(m²·sr)左右,随后从径向 0.2~0.35 m 衰减非常少。这是由于入射辐射比较低,温度的升高导致气体自身辐射作用大于吸收作用,从而表现为辐射亮度的升高,此时温度梯度越大,辐射亮度升高越多。

图 9 为天顶角 90°、方位角 0°方向中心线上的

喷流辐射亮度,它代表的不是沿喷流中心线的辐射传输,而是代表了在喷流中心线上不同位置的气体向垂直于中心线方向的红外辐射亮度。图 6 中喷流温度从出口开始先下降后升高经历了 6 次起伏震荡趋于稳定。图 9 中辐射亮度的起伏与温度的分布相对应,同样是先下后升高经历了 6 次起伏最后趋于平稳。

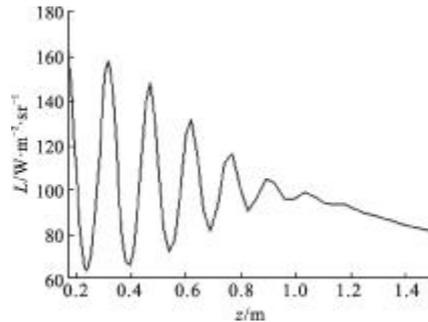


图 9 天顶角 90°、方位角 0°方向中心线上的辐射亮度

Fig.9 Infrared radiance along central line at zenithal angle of 90° and azimuth angle of 0°

(2) NPR_{des}=5 的喷管

图 10 中(a)~(b)给出了 NPR_{des}=5 喷管流场计算的温度、压力分布图,该喷管接近工作状态,出口压力接近环境压力。

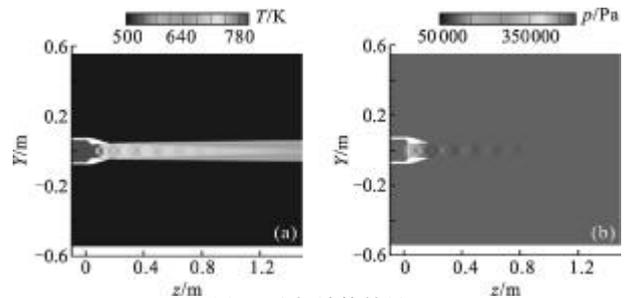


图 10 流场计算结果

Fig.10 Flow field of plume

图 11(a)给出了 NPR_{des}=5 的天顶角为 0°方向的

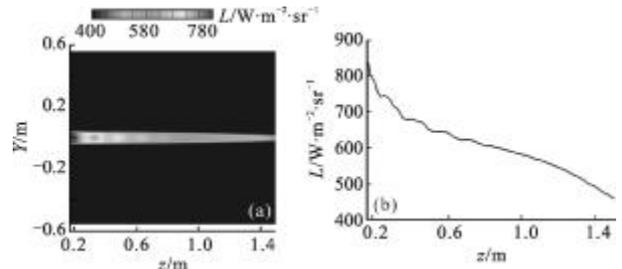


图 11 天顶角 0°方向的喷流红外辐射亮度

Fig.11 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 0°

喷流红外辐射亮度云图;图 11(b)给出了天顶角为 0° 方向上的中心线上的喷流红外辐射亮度。

图中,喷流辐射亮度沿该方向不断衰减。高温喷流出口的辐射亮度从出口到 0.5m 处的 820W/(m²·sr)迅速衰减到 650W/(m²·sr),然后逐渐衰减到 450W/(m²·sr)。

图 12 中,图(a)为天顶角 90°、方位角 0°方向喷流红外辐射亮度分布云图;图(b)为从 90°方位角观察该方向喷流红外辐射亮度传输云图。从图中可以

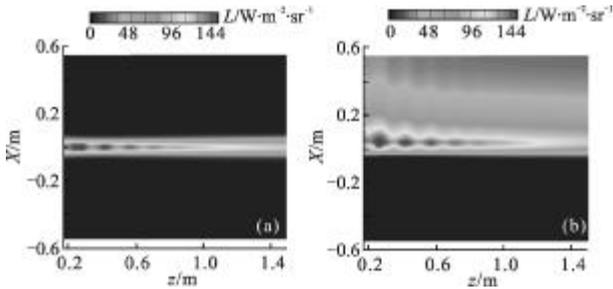


图 12 天顶角 90°方向喷流红外辐射亮度分布云图

Fig.12 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 90°

看出,高温热喷流在天顶角 90°方向形成一条高辐射区,该高辐射区与温度场核心区相对应。它们沿辐射传输方向在径向距离 0.1 m 附近的地方衰减比较剧烈,这里正是温度梯度最大的区域,然后再向外传输过程衰减量就非常少了。图 13 为天顶角 90°、方位

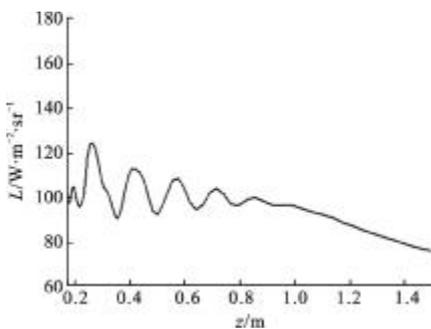


图 13 天顶角 90°、方位角 0°方向中心线上的辐射亮度

Fig.13 Infrared radiance along central line at zenithal angle of 90° and azimuth angle of 0°

角 0°方向中心线上的喷流辐射亮度。对于 NPR_{des}=5 的喷管来说,辐射亮度的起伏与温度的分布相对应,随着温度的升高与降低有相应的波动。

(3) NPR_{des}=6 的喷管

图 14 中,图(a)~(b)为 NPR_{des}=6 喷管流场计算的温度、压力分布图。出口压力过低,经过斜激波后压力(温度)迅速升高,然后再继续膨胀,膨胀过后在经过斜激波压力(温度)又迅速升高,这样往复直到

喷流压力与环境压力平衡,一共形成了 5 个高温区。

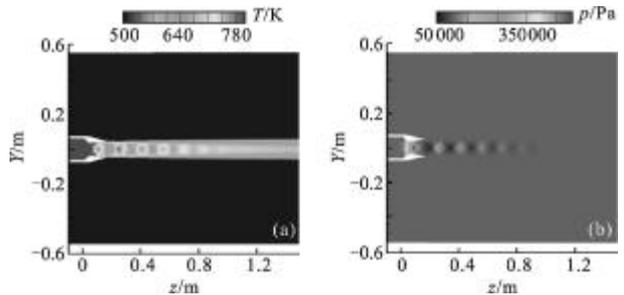


图 14 流场计算结果

Fig.14 Flow field of plume

图 15(a)给出了 NPR_{des}=6 的天顶角为 0°方向的喷流红外辐射亮度云图;图 15(b)给出了天顶角为 0°方向上的中心线上的喷流红外辐射亮度。

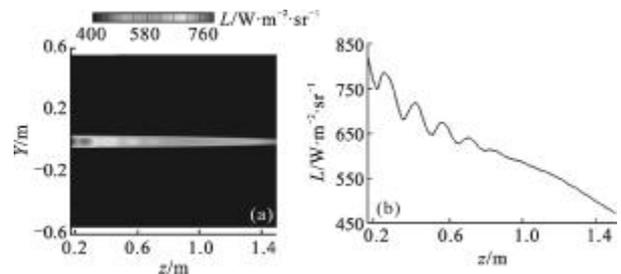


图 15 天顶角 0°方向的喷流红外辐射亮度

Fig.15 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 0°

图中,喷流辐射亮度沿该方向不断衰减,在 Z=0.9 之前有所起伏。高温喷流出口的辐射亮度由 820 在 0.23 处衰减到 750 W/(m²·sr),然后辐射亮度由衰减变为增强,到 0.25 m 处达到顶点然后再剧烈衰减,这样经历数次波动最后在 1.5 m 位置衰减到 460 W/(m²·sr)。

图 16(a)为天顶角 90°、方位角 0°方向喷流红外辐射亮度分布云图;图 16(b)为从 90°方位角观察该方向喷流红外辐射亮度传输云图。如图 16(a)所示,

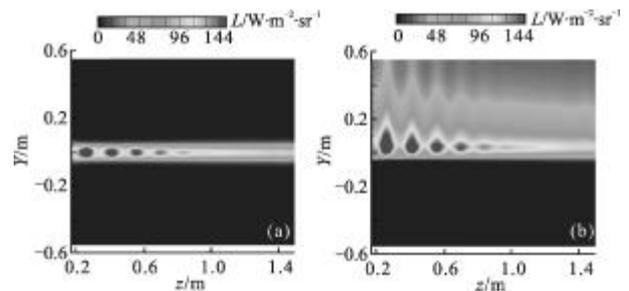


图 16 天顶角 90°方向喷流红外辐射亮度分布云图

Fig.16 Infrared radiance of plume at zenithal angle of 90°

高温热喷流在天顶角 90° 方向形成一个个高辐射区,该高辐射区与喷流高温区相对应。如图 16(b) 所示,它们沿辐射传输方向同样是先增强后减弱。

图 17 为天顶角 90° 、方位角 0° 方向中心线上的喷流辐射亮度,如图所示,辐射亮度随着温度的升高与降低有相应的波动。

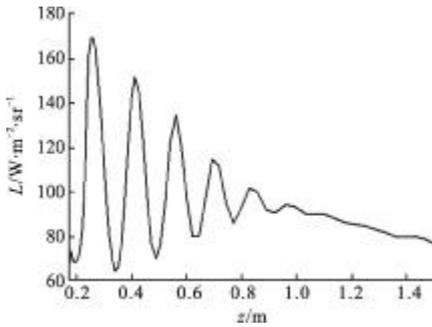


图 17 天顶角 90° 、方位角 0° 方向中心线上的辐射亮度

Fig.17 Infrared radiance along central line at zenithal angle of 90° and the azimuthal angle of 0°

(4) 3 个喷管的喷流红外辐射特性对比与分析

图 18 为 $NPR_{des}=4, 5$ 和 6 的喷管在相同的计算

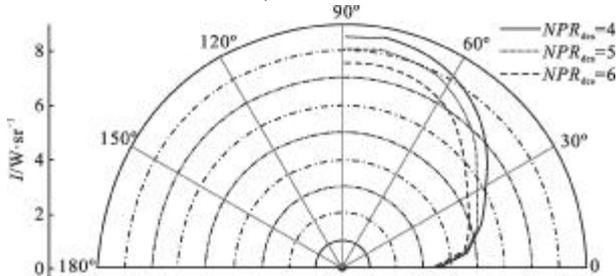


图 18 3 个喷流 $3-5 \mu\text{m}$ 波段辐射强度分布对比

Fig.18 Intensity comparison of three nozzle in $3-5 \mu\text{m}$

条件下得出的喷流辐射强度随天顶角分布。高温喷流区投影面积随着天顶角增大不断增大,所以喷流的辐射强度随天顶角的增大而增大,在 90° 达到最大。3 个喷流辐射强度依次减弱,随着天顶角的增大,差距越来越大。

图 19 中,图(a)和图(b)分别给出方位角 0° 、天顶角 0° 和 90° 方向 3 个喷管中心线上的喷流红外辐射亮度对比。 $NPR_{des}=4$ 和 6 的喷管随着喷流温度的波动而波动,与温度场相对应,它们的波动也是相反的, $NPR_{des}=5$ 的喷管相对于 $NPR_{des}=4$ 和 6 波动比较小。

图 20 中,图(a)~(b)为方位角为 0° 、天顶角 0° 和 90° 的喷流光谱辐射强度分布。如图所示,在 $2200\sim$

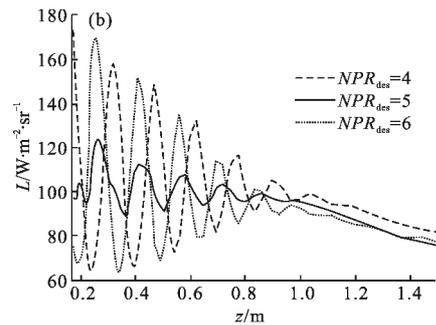
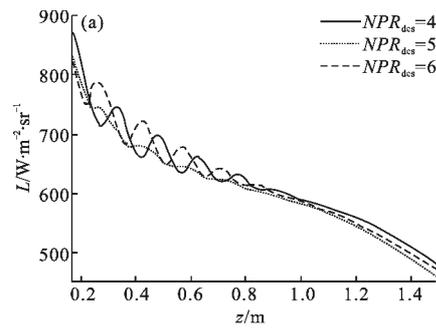


图 19 3 个喷管中心线上喷流的辐射亮度对比

Fig.19 Radiance comparison of three nozzle along central line

2400 cm^{-1} 波段喷流在这两个方向都是有明显的发射带,在大多数波段,这 3 个喷管的光谱辐射强度相当,而某些波段 $NPR_{des}=4, 5, 6$ 的喷流光谱辐射强度依次降低。

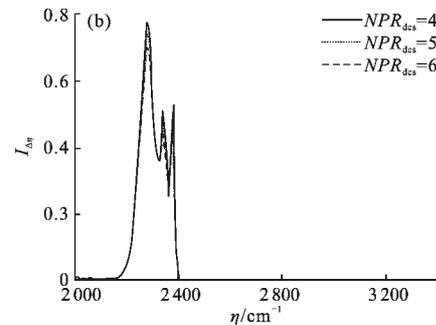
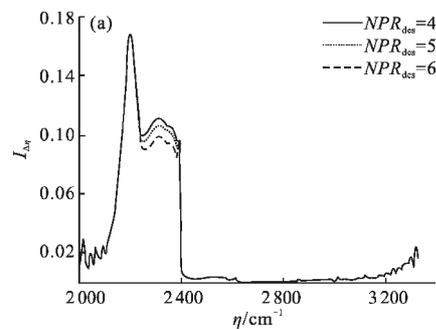


图 20 喷流光谱辐射强度对比

Fig.20 Spectral intensity comparison of three nozzle

3 结 论

文中通过对 3 个基本轴对称收扩喷管分别处于欠膨胀状态、设计状态和过膨胀状态的红外辐射特性的分析和对比,得出如下结论:

(1) 如果入射的辐射比较强,温度的突然下降导致喷流吸收作用占主导,此时大温度梯度会使辐射亮度剧烈衰减,如果入射辐射比较低,温度的突然升高将导致气体自身辐射作用大于吸收作用,从而表现为辐射亮度的升高,此时温度梯度越大,辐射亮度升高的越多。

(2) 通过 3 个喷管的对比, $NPR_{des}=4$ 的喷流辐射强度最大, $NPR_{des}=5、6$ 依次降低,这是由于工作状态的影响,喷流波系不同,出现的高温区域也不同造成的,说明喷流流动特点的改变影响红外辐射的大小,通过控制喷流的流动可以控制喷流红外辐射强度。

参考文献:

- [1] Xu Nanrong. Numerical computation of infrared plume radiation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1995, 16(6): 647-653. (in Chinese)
- [2] Zhan Guang, Lee Chunhian. Numerical computations of infrared signatures in exhaust flow fields of jet engines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(8): 829-833. (in Chinese)
- [3] Dong Shikui, Yu Jianguo, Li Donghui. Numerical modeling of infrared radiation properties of exhaust plume by the discrete ordinates method in body-fitted coordinates [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(2): 159-162. (in Chinese)
- [4] Hao Jinbo, Dong Shikui, Tan Heping. Numerical simulation of infrared radiation properties of solid rocket engine exhaust plume[J]. J Infrared Millim Waves, 2003, 22(4): 246-250. (in Chinese)
- [5] Zhu Xijuan, Wang Qiang. Effect of micro-jets mixing enhancement on infrared radiation of plume [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(4): 483-486. (in Chinese)
- [6] Zhu Xijuan, Eriqitai, Li Jiajun, et al. Effect of jet mixing enhancement by pulsed blowing on infrared radiation of plume [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(5): 551-555. (in Chinese)
- [7] Chai J C, Lee H S, Patankar S V. Finite volume method for radiative heat transfer [J]. J of Thermophysics and Heat Transfer, 1994, 8(3): 419-425.
- [8] John R. Carlson. Computational prediction of isolated performance of an axisymmetric nozzle at mach number 0.9 [R]. Nasa Technical Memorandum 4506, Hampton, Virginia: Langley Research Center, 1994.
- [9] Young S J. Nonisothermal band model theory [J]. J of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1976, 18: 1-28.
- [10] Ferziger J H, Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics[M]. Berlin: Springer, 1996.