窄谱带模型数值研究高温喷流动态红外特性

王雁鸣，董士奎，谈和平，帅 永

（哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院，哈尔滨 150001，hit_wangym@yahoo.com.cn）

摘 要：对高温超声速喷流流场的动态红外辐射特性进行研究. 采用窄谱带模型结合光谱数据库及Mie散射理论建立求解非灰吸收、发射、散射性介质红外辐射传输计算模型. 数值模拟了某高温喷流2～5 μm光谱红外特性，获得了不同飞行高度时高温喷流的红外仿真热像、光谱、波段及总辐射强度仿真数据. 比较结果表明：高温喷流在2～5 μm光谱呈明显双峰特性；动态飞行时喷流红外光谱选择性是相类似的，光谱总辐射强度随高度增加先增大后减弱；低空时2～3 μm波段辐射强度大于4～5 μm波段辐射强度，而随着高度的增加，4～5 μm波段辐射强度将大于2～3 μm波段辐射强度.

关键词：高温喷流；红外辐射；动态特性；窄谱带模型；Mie理论

中图分类号：TP124 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)11－1771－04

Numerical study on dynamic infrared properties of high temperature jetflow using narrow-band model

WANG Yan-ming, DONG Shi-kui, TAN He-ping, SHUAI Yong

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, hit_wangym@yahoo.com.cn)

Abstract: Dynamic infrared properties of high temperature hypersonic jetflow have been investigated. A numerical method was developed to solve the radiative heat transfer for non-gray absorbing, emitting and scattering medium by using the narrow-band model combined with molecular spectral access and the Mie scattering theory. The 2－5 microwave infrared properties of a high temperature jetflow including infrared images, spectral radiances, inband radiances and apparent source intensities were simulated at different altitudes. The results show that there are two distinct peak values in the jetflow spectra, and the spectral selection are similar at various altitudes. When the flight altitude begins increasing with ignition, the infrared spectral radiances increase until a certain altitude, and then get lower. At low altitude, the 2－3 microwave inband radiance are larger than the 4－5 microwave inband radiance, and the 4－5 inband radiance will become bigger than the 2－3 microwave inband radiance when the altitude increases.

Key words: high temperature jetflow; infrared radiation; dynamic property; narrow－band model; Mie theory

高温自由射流的红外光谱特性研究在燃烧诊断、火焰温度测量、目标探测等领域有着广泛的研究意义以及应用背景. 发动机高速排气系统尾流属于一种含粒子高温喷流，对于空间红外探测、跟踪及隐身等技术的发展，喷流的红外辐射特征是主要研究依据之一，有必要对其进行理论研究与数值仿真. 国外对于高温喷流红外特性的试验与理论研究开展较早，至今仍有相关的研究在进行与发展[1－2]. 近年来，国内对于高温喷流红外特性的研究已有一些成果[3－8].

目前，高温喷流的动态红外辐射信号还不易于实测获取，数值方法研究其红外辐射特性变化规律具有实际意义. 本文建立吸收散射性介质内辐射传输计算模型，模拟高温喷流不同工况下的

收稿日期：2009－06－14.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50776025,50806017).
作者简介：王雁鸣(1980—)，男，博士研究生；
谈和平(1952—)，男，教授，博士生导师.

红外辐射特性,并研究其动态变化规律.

1 计算模型

本研究在工程计算获得高温射流流场温度、压力及组分浓度分布的基础上,针对非灰、非均匀吸收、发射、散射性介质内的辐射传输问题建立红外特性计算模型.

1.1 辐射传输方程求解

由辐射传输理论,在 $\vec{\Omega}$ 方向考虑介质内的吸收、发射、散射时辐射传输方程为

$$\frac{\mathrm{d}I_\lambda(s)}{\mathrm{d}s} = -\kappa_{a\lambda}I_\lambda(s) - \kappa_{s\lambda}I_\lambda(s) + \kappa_{a\lambda}I_{b\lambda}(s) + \frac{\kappa_{s\lambda}}{4\pi}\int_{4\pi} I_\lambda(s,\vec{\Omega}')\Phi_\lambda(\vec{\Omega}',\vec{\Omega})\mathrm{d}\vec{\Omega}'. \quad (1)$$

式中:$I_\lambda(s)$ 为 $\vec{\Omega}$ 方向的光谱辐射强度,$I_{b\lambda}(s)$ 为在 $\vec{\Omega}$ 方向的黑体光谱辐射强度,$\kappa_{a\lambda}$ 为含粒子介质的吸收系数,$\kappa_{s\lambda}$ 为粒子的散射系数,$I_\lambda(s,\vec{\Omega}')$ 为 $\vec{\Omega}'$ 方向光谱散射强度,$\Phi_\lambda(\vec{\Omega}',\vec{\Omega})$ 为散射相函数. 式(1) 右边第一项是吸收(气体及粒子) 引起的损失,第二项是散射引起的损失,第三项是由于发射引起的增益,第四项是由于向 $\vec{\Omega}$ 方向的散射所得的增益. 将吸收与散射项合并,可得

$$\frac{\mathrm{d}I_\lambda(s)}{\mathrm{d}s} = -\kappa_{e\lambda}I_\lambda(s) + \kappa_{a\lambda}I_{b\lambda}(s) + \frac{\kappa_{s\lambda}}{4\pi}\int_{4\pi} I_\lambda(s,\vec{\Omega}')\Phi_\lambda(\vec{\Omega}',\vec{\Omega})\mathrm{d}\Omega'. \quad (2)$$

其中:$\kappa_{e\lambda}$ 为介质的衰减系数,$\kappa_{e\lambda} = \kappa_{a\lambda} + \kappa_{s\lambda}$.

式(2) 除以 $\kappa_{e\lambda}$ 并引入光学厚度 $\tau_\lambda = \kappa_{e\lambda}s$,得

$$\frac{\mathrm{d}I_\lambda(\tau_\lambda)}{\mathrm{d}\tau_\lambda} = -I_\lambda(\tau_\lambda) + (1-\omega_\lambda)I_{b\lambda}(\tau_\lambda) + \frac{\omega_\lambda}{4\pi}\int_{4\pi} I_\lambda(\tau_\lambda,\vec{\Omega}')\Phi_\lambda(\vec{\Omega}',\vec{\Omega})\mathrm{d}\vec{\Omega}'. \quad (3)$$

式中:ω_λ 为反照率,且 $\omega_\lambda = \kappa_{s\lambda}/\kappa_{a\lambda}$.

考虑到计算效率问题,本文采用热流法求解辐射传输方程,即将所有散射分成沿视线正负方向两部分,则方程(3)可简化为

$$\pm\frac{\mathrm{d}I_\lambda^{\pm}}{\mathrm{d}\tau_\lambda} = -I_\lambda^{\pm} + (1-\omega_\lambda)I_{b\lambda} + \omega_\lambda(f_\lambda I_\lambda^{\pm} + b_\lambda I_\lambda^{\mp}).$$

其中:f_λ、b_λ 分别为正向和反向辐射由于散射进入控制体的份额.

1.2 窄谱带模型

高温喷流内 H_2O、CO_2 等分子是强辐射源,其产生的红外辐射特征信号是探测、识别的主要依据. 本文根据高温喷流内主要气体组分,首先以 HITEMP/HITRAN 光谱数据库为基础,建立了每一种气体在 101.325 kPa 下、100 ~ 3 000 K 内间隔 100 K 的谱线参数数据库. 采用统计谱带模型建立某一光谱间隔内(本文取 5 cm^{-1})平均透射率与光谱关系,根据 Malkmus 线强度分布,在第 i 个波数区间$[w_i - \Delta w/2,\ w_i + \Delta w/2]$ 内的平均穿透率 $\bar{t}_i$

$$\bar{t}_i = \exp\left[-2B_i\left(\sqrt{1+\frac{\bar{\kappa}_i u}{4B_i}} - 1\right)\right].$$

其中:B_i 为第 i 区间谱线精细结构参数,$B_i = \bar{\gamma}_i/\bar{d}_i$;$\bar{\kappa}_i$ 为第 i 区间内的平均吸收系数;$\bar{\gamma}_i$ 为第 i 区间内谱线平均半宽;$\bar{d}_i$ 为第 i 区间内的谱线平均间距,u 为压力行程长度,可由下式给出:

$$u = p_g L\left(\frac{296}{T}\right).$$

式中:p_g 为气体组分分压力,L 为行程长度,T 为气体温度. 窄谱带参数可以由不同的方式得到,早期的研究者是通过拟合实验数据或根据光谱学理论直接计算. 本文采用 Young[9] 数值平均方法计算谱带模型参数,即

$$\bar{\kappa}_i = \frac{1}{\Delta w}\sum_{m=1}^{M} S_i^m,$$

$$\bar{\gamma}_i = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\gamma_i^m,$$

$$\bar{d}_i = \frac{\bar{\kappa}_i\bar{\gamma}_i}{\left(\frac{1}{\Delta w}\sum_{m=1}^{M}\sqrt{S_i^m\gamma_i^m}\right)^2}.$$

其中:S_i^m 为第 i 光谱区内第 m 条谱线强度,γ_i^m 为第 i 光谱区内第 m 条谱线半宽;M 为第 i 光谱内谱线总数;Δw 为波数区间.

1.3 Mie 散射模型

对于含粒子高温喷流内的固相粒子,本研究采用 Mie 散射理论计算其吸收系数、散射系数. Mie 散射公式是非偏振平面电磁波投射均匀球形粒子时得到的 Maxwell 方程的远场解. 球形粒子衰减因子 Q_e、吸收因子 Q_a、散射因子 Q_s、散射反照率和散射相函数的计算公式为

$$Q_e = \frac{C_e}{\pi r^2} = \frac{2}{\chi^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\mathrm{Re}[a_n + b_n],$$

$$Q_s = \frac{C_s}{\pi r^2} = \frac{2}{\chi^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)[|a_n|^2 + |b_n|^2],$$

$$Q_a = Q_e - Q_s,$$

$$\omega_s = Q_s/Q_e,$$

$$\Phi(\theta) = \frac{2}{Q_s\chi^2}[|S_1|^2 + |S_2|^2].$$

式中：Re 表示取复数的实部，r 为粒子半径，χ 为尺度参数，公式为 $\chi = \pi D/\lambda$，$D = 2r$，C_e 与 C_s 为衰减和散射截面，a_n、b_n 称为米氏散射系数，S_1，S_2 称为复数幅值函数（也称散射函数）. 其计算式如下：

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}[a_n\pi_n(\cos\theta) + b_n\pi_n(\cos\theta)],$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}[a_n\tau_n(\cos\theta) + b_n\pi_n(\cos\theta)].$$

π_n、τ_n 称为散射角函数，θ 为散射角，是投射方向与散射方向的夹角.

2 仿真结果及分析

应用上述模型，本文模拟了某高温喷流 2 ~ 5 μm 光谱区间的红外辐射特性，光谱分辨率为 5 cm^{-1}，计算获得了不同飞行高度时垂直流场轴线探测方向喷流光谱辐射强度、波段辐射强度及表观总辐射强度仿真数据.

表 1 为高温喷流在喷口处的温度及组分分布，其中 R_0 为喷口半径. 喷流燃气中含有 Al_2O_3 粒子，本文算例中喷口处粒子平均粒径为 10 μm，数密度约为 10^8. 图 1 为地面和高空工程计算高温喷流流场的无因次温度分布，其对应的红外仿真热像仿真结果如图 2 所示. 低空喷流处于欠膨胀状态，靠近喷口附近燃气温度很高，且有明显的高温后燃区，而高空时，喷流体积迅速膨胀，燃气变得稀薄，无明显后燃. 对比热像图可以看出喷流红外辐射强度与温度分布呈正相关. 低空时辐射强度主要来自后燃区，而高海拔时辐射强度较低，主要来自喷口处的燃气，同时可探测到辐射强度的范围大大增加.

表 1　高温喷流喷口参数

R/R_0	T/K	组分	体积分数
0	1 929	H_2O	0. 153 65
0. 25	1 937	CO_2	0. 025 05
0. 50	1 977	CO	0. 245 03
0. 75	2 201	HCl	0. 171 40
1. 00	1 835	H	0. 293 28

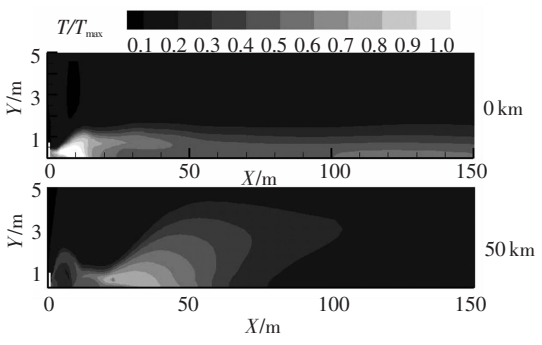


图 1　喷流温度场无因次分布

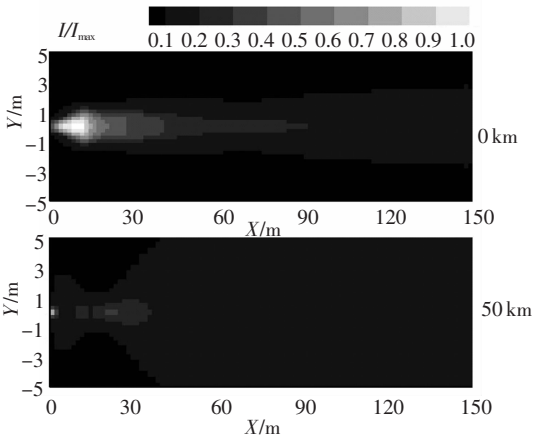


图 2　喷流红外仿真热像

图 3 为探测方向垂直于喷流轴向并与对称轴相交时，4. 3 μm 谱带的无因次辐射强度沿轴分布情况. 可以看出，低空时辐射强度最大值出现在喷口附近，随着高度增加，后燃区后移，辐射强度最大值出现在喷流中段，高空时后燃区逐步消失，辐射强度值自喷口后沿轴向迅速下降.

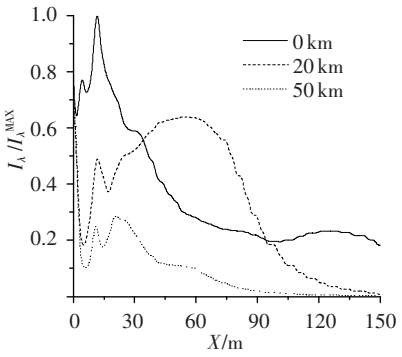


图 3　沿轴向位置喷流 4. 3 μm 辐射强度

图 4 给出了喷流不同飞行高度时无因次表观总光谱辐射强度. 可以看出光谱选择性非常显著，在 2 ~ 5 μm 光谱区间呈明显的双峰特性：（1）靠近短波的“蓝”峰主要为 H_2O 气体在 2. 7 μm 附近的峰值光谱；（2）靠近长波的“红”峰主要为 CO_2 气体在 4. 3 μm 附近的峰值光谱. 因本文算例中 Al_2O_3 粒子数密度较低，粒子的发射和散射作用对喷流的红外辐射特性影响较小. 从动态特性上来看，不同高度喷流红外光谱选择性规律是相类似的. 低空喷流的辐射源主要来自后燃区，随高度增加，环境压力减小，二次燃烧充分，体积膨胀，喷流光谱辐射强度在 20 km 高度附近达到最大值；随着高度继续增加，环境压力减小，使燃气迅速膨胀，气体、粒子组分变得稀薄，同时，高空含氧量减少，后燃区逐步消失，红外信号开始逐渐减弱.

为了进一步讨论双峰的相对变化，本文对短波（2 ~ 3 μm）和中波（4 ~ 5 μm）喷流光谱总辐射强度进行光谱积分，获得了不同高度下的比较结果，如图 5 所示. 可以看出，低空时短波辐射强度

大于中波辐射,而随着高度的增加中波辐射强度逐渐居于优势.

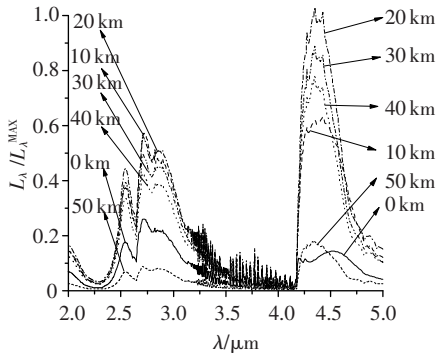
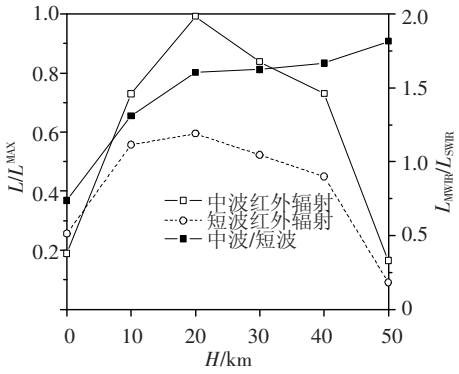


图 4 不同高度喷流总光谱辐射强度



(MWIR – 中波红外辐射,SWIR – 短波红外辐射)

图 5 不同高度波段辐射强度比较

3 结 论

1)低空喷流辐射主要来自后燃区,高海拔喷流辐射主要来自喷口处,喷流总辐射强度随高度增加先增大后减弱.

2)不同高度喷流红外光谱选择性规律是相类似的,在 2 ~ 5 μm 光谱区间呈明显的双峰特性

3)低空时短波辐射强度大于中波辐射,而随着高度的增加中波辐射强度逐渐居于优势.

参考文献:

[1] BEIER K, LINDERMEIR E. Comparison of line-by-line and molecular band IR modeling of high altitude missile plume[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 105: 111 – 127.

[2] BURT J M, BOYD I D. High altitude plume simulations for a solid propellant rocket[R]. 2007: AIAA – 2007 – 5703.

[3] HAO Jinbo, DONG Shikui, TAN Heping. Numerical simulation of infrared radiation properties of solid rocket engine exhaust plume[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(4): 246 – 250.

[4] DONG Shikui, YU Jianguo, LI Donghui, *et al.* 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.

[5] SHUAI Yong, DONG Shikui, TAN Heping. Numerical simulation for infrared radiation characteristics of exhaust plume at 2.7μm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 402 – 405.

[6] CAI Guobiao, ZHU Dingqiang, ZHANG Xiaoying. Numerical simulation of the infrared radiative signatures of liquid and solid rocket plume[J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(6): 473 – 480.

[7] FENG Songjiang, NIE Wansheng, XIE Qingfen, *et al.* Numerical simulation of flow field and radiation of an aluminized solid-propellant rocket multiphase exhaust plume[R]. 2007: AIAA – 2007 – 4415.

[8] LIU Youhong, SHAO Wanren, ZHANG Jingxiu. Numerical simulation of flowfield and infrared characteristics of an aeroengine exhaust system and its plume[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 591 – 597.

[9] YOUNG S J. Nonisothermal Band Model Theory[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1976, 18: 1 – 28.

(编辑 杨 波)