

基于多线组宽带模型与积分微分混合算法的喷管远程红外成像计算

刘笑瑜^{1,2}, 胡海洋^{1,2}, 王 强^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对现有宽带 k 分布模型不适合高温喷流 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段发射辐射在大气中远距离传输衰减特性计算的问题,将之前用于全光谱模型的多线组技术应用于宽带模型,并对光谱吸收系数的分组优化状态点进行了针对性调整。无限宽度多层气体辐射特性一维/准一维算例的计算结果表明,多线组技术可大幅提高原始全光谱与宽带模型对强非均匀气体辐射特性的计算精度,同时保持对灰体固壁辐射的良好兼容性。以此为基础,对带冷却装置 V 形尾缘收缩喷管的耦合换热特性和远程红外特性进行了数值研究,结果表明:气体辐射对喷管固壁温度分布的影响不能忽略;多线组宽带模型对跨声速排气系统 70 km 红外成像的预测误差在 7% 左右。

关 键 词: 红外成像; 多线组宽带模型; 耦合换热; 气体辐射; k 分布模型

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Calculation of nozzle remote infrared imaging based on multi-scale multi-group wideband model and integrated differential hybrid algorithm

LIU Xiaoyu^{1,2}, HU Haiyang^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the problem that existing k distribution model is not suitable for high temperature flow $3\sim 5\mu\text{m}$ wave band emission radiation transmission attenuation characteristic in atmospheric long distance calculation, multi-scale multi-group technology used in full-spectrum model before was applied in wideband model, and the grouping state points on the spectral absorption coefficient were adjusted. The calculation results of one-dimensional/quasi one-dimensional numerical example of infinite width multilayer gas radiation characteristics show that multi-scale multi-group technology can improve the calculation precision of original full spectrum and wideband model while keeping compatibility with rational of gray wall. On this basis, the coupling heat transfer characteristics and the remote infrared

收稿日期: 2017-06-01

作者简介: 刘笑瑜(1989—),男,硕士生,从事气动与红外辐射方面研究。

引用格式: 刘笑瑜,胡海洋,王强. 基于多线组宽带模型与积分微分混合算法的喷管远程红外成像计算[J]. 航空动力学报,2018,33(10):2414-2423. LIU Xiaoyu, HU Haiyang, WANG Qiang. Calculation of nozzle remote infrared imaging based on multi-scale multi-group wideband model and integrated differential hybrid algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10): 2414-2423.

characteristics of V nozzle trailing edge contraction with cooling device were studied. The results show that the gas radiation effect on the solid wall temperature distribution in the nozzle can not be ignored. The prediction error of the remote infrared images for transonic exhaust system at 70 km with use of the multi-scale multi-group wideband model is about 7%.

Key words: infrared imaging; multi-scale multi-group wideband model; coupling heat transfer; gas radiation; k -distribution model

航空航天领域喷气式飞行器的远程红外探测、军事领域红外制导导弹的研发都涉及高温燃气喷流远程红外特性的预测。但相比固体辐射的连续光谱,气体辐射光谱是由数百万谱线叠加而成随波长剧烈变化的复杂非连续光谱。逐线(line-by-line, LBL)计算是最准确的气体辐射特性计算方法^[1],但因为计算量非常巨大,很难用于工程领域,一般只将其作为检验其他模型计算精度的基准。当前气体辐射特性的工程计算主要采用基于 k 分布理论的窄带^[2]、宽带和全光谱模型^[2-3],对于均匀气体辐射特性,其预测精度接近逐线计算,但计算量小几个量级。上述 k 分布模型基于关联 k 假设计算非均匀气体的辐射特性,在气体压力变化剧烈,而温度和组分变化缓场合,该假设被证明是成立的^[4];但在气体温度和参与性组分摩尔比剧烈变化场合,关联 k 假设不再成立,导致上述常规 k 分布模型的计算误差大幅增加^[3,5]。为克服上述问题,Modest 团队分别提出了 MS(multi-scale)^[6]与 MG(multi-group)^[7]多线组技术,分别用于提高标准全光谱(full-spectrum k distribution, FSK)^[8]模型在参与性组分摩尔比与温度剧烈变化情况下的计算精度。其核心思想是对气体的光谱吸收系数进行分组,使每一组内的气体辐射光谱在不同压力、温度、组分摩尔比下仍然具有关联 k 特性。之后的多线组全光谱(MSMGFSK)模型综合了 MSFSK 模型和 MGFSK 模型的优点,在很多研究工作中被用于温度和组分不均匀的高温气体混合物的辐射换热特性计算^[9-10]。

喷气式发动机高温喷流大气窗口波段远程红外特性计算同样面临喷流燃气与环境空气的温度和辐射参与性组分(水蒸气、二氧化碳)比例相差巨大,导致原始宽带 k 分布模型计算误差过大的问题。为克服该问题,本文将上述 MSMG 多线组思想应用于大气窗口波段宽谱带,并针对性地优化了其光谱吸收系数分组。一维与三维计算结果对比逐线计算,验证了多线组技术对宽带 k 分布(WB)模型计算精度的提升。

1 气体辐射模型

1.1 MSMGFSK 和 MSMGWB 模型的建立

不考虑散射的辐射传输方程(RTE)可以写成^[11]

$$\begin{cases} \frac{dL_\eta}{ds} = k_\eta(\underline{\phi})L_{b\eta} - k_\eta(\underline{\phi})L_\eta \\ L = \int_0^\infty L_\eta d\eta \end{cases} \quad (1)$$

其中 η 为波数, k_η 为光谱吸收系数, $\underline{\phi} = (T, p, x)$ 代表了影响光谱吸收系数 k_η 的所有气体热力学参数集合(温度 T 、压力 p 和摩尔分数 x), L 为辐射亮度, L_η 为光谱辐射亮度, $L_{b\eta}$ 为黑体辐射函数(基于普朗特黑体辐射定律), s 是辐射传递的方向。

当介质中包含两种或者两种以上辐射参与性组分时,式(1)可以写成

$$\begin{cases} \frac{dL_{n\eta}}{ds} = k_{n\eta}(\underline{\phi})L_{b\eta} - k_\eta(\underline{\phi})L_{n\eta} \\ k_\eta = \sum_{n=1}^N k_{n\eta} \end{cases} \quad (2)$$

其中 N 为参与性组分的数量; $L_\eta = \sum_{n=1}^N L_{n\eta}$ 。式(2)中每种组分对应的光谱辐射亮度 $L_{n\eta}$ 由该组分自身的光谱吸收系数($k_{n\eta}$)产生,但其传输过程中受到所有组分吸收光谱的衰减。进一步地,可以根据每种辐射参与性组分的光谱吸收系数的温度依赖性将其分成 M 个互不相关的子光谱,式(2)由此进一步变换为

$$\begin{cases} \frac{dL_{mn\eta}}{ds} = k_{mn\eta}(\underline{\phi})L_{b\eta} - k_\eta(\underline{\phi})L_{mn\eta} \\ k_\eta = k_{mn\eta} + \sum_{l=1, l \neq n}^N \sum_{m=1}^M k_{lm\eta} \\ L_\eta = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M L_{mn\eta} d\eta \end{cases} \quad (3)$$

根据 k 分布的概念和关联 k 假设,对式(3)进

行基于 $k_{nm\eta}$ ($0 < \eta < \infty^{[8]}$) 的近似 k 分布变化, 得到

$$\begin{cases} \frac{dL_{nm\eta}}{ds} = k_{nm}(T_0, \underline{\phi}, g_{nm}) \bar{a}_{nm}(T, T_0, \underline{\phi}, g_{nm}) \cdot \\ L_b - \lambda_{nm} L_{nm\eta} \\ f_{nm}(T, \underline{\phi}, k_{nm}) = \frac{1}{L_b(T)} \int_0^\infty L_{b\eta}(T) \delta[k_{nm} - \\ k_{nm\eta}(\underline{\phi})] d\eta \\ g_{nm}(T_0, \underline{\phi}_0, k_{nm0}) = g_{nm}(T_0, \underline{\phi}, k_{nm}) = \\ \int_0^{k_{nm}} f_{nm}(T_0, \underline{\phi}, k'_{nm}) dk'_{nm} \mid \forall \eta \end{cases}$$

(4)

其中 $\underline{\phi}_0 = (T_0, p_0, x_0)$ 是参考状态的气体热力学参数集; δ 是 Dirac delta 函数; g_{nm} 是第 n 种组分第 m 组的累计 k 分布函数

$$\begin{cases} L_b(T) = \int_0^\infty L_{b\eta}(T) d\eta \\ \int_0^\infty L_{\eta} d\eta = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_0^1 L_{nm\eta} dg_{nm} \end{cases}$$

(5)

$k_{nm}(T_0, \underline{\phi}, g_{nm})$ 是 g_{nm} 的光滑单调递增函数, 这就可以确保方程(5)能够通过高斯积分准确计算。 $\bar{a}_{nm}(T, T_0, \underline{\phi}, g_{nm}) = \frac{f_{nm}(T, \underline{\phi}, k_{nm})}{f_{nm}(T_0, \underline{\phi}, k_{nm})}$ 是拉伸

因子, λ_{nm} 是第 n 种组分第 m 组吸收系数与其他所有组分在对应波数处吸收系数的重叠系数, 可以写成

$$\lambda_{nm} L_{nm\eta} = k_{nm} L_{nm\eta} + \frac{\int_0^\infty \left[\sum_{l=1, l \neq n}^N \sum_{j=1}^M k_{lj\eta} \right] L_{nm\eta}(\underline{\phi}) \delta[k_{nm} - k_{nm\eta}(\underline{\phi})] d\eta}{f_{nm}(T_0, \underline{\phi}, k_{nm})}$$

(6)

基于改进的卷积理论, k_{nm} 对应的 λ_{nm} 可由式(6)计算得到

$$\begin{cases} \int_0^{g_{nm}(k'_{nm})} k'_{nm} dg'_{nm}(T, \underline{\phi}, k) = \int_0^{g(\lambda_{nm})} k'_{nm} dg'(T, \underline{\phi}, k) \\ f(T, \underline{\phi}, k) = \frac{1}{L_b(T)} \int_0^\infty L_{b\eta}(T) \delta[k - k_{\eta}(\underline{\phi})] d\eta \\ g(T, \underline{\phi}, k) = \int_0^k f(T, \underline{\phi}, k') dk' \end{cases}$$

(7)

其中 $g(k)$ 是基于气体混合物的重叠光谱的累计 k 分布函数。图 1 横坐标是热力学参数 $\underline{\phi}_1$ ($p = 10^5$ Pa, $T = 1500$ K, $x_{H_2O} = 0.1$, $x_{CO_2} = 0.1$) 下某光谱吸收系数分组的 g_{nm} 和 $\underline{\phi}_2$ ($p = 10^5$ Pa, $T = 300$ K,

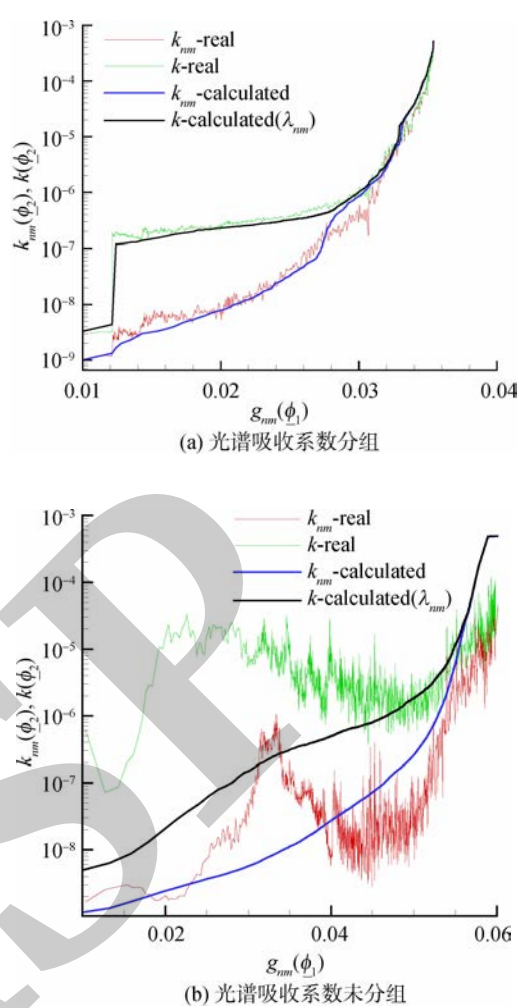


图 1 分组与未分组 CO₂ 自身光谱吸收系数与 H₂O-CO₂ 混合物光谱吸收系数的 MSMGWB 模型计算结果与真实值对比

Fig. 1 Comparison between calculated results with the MSMGWB model and real value of grouped and ungrouped CO₂ and H₂O-CO₂ mixture absorption coefficient

$x_{H_2O} = 0.024$, $x_{CO_2} = 3.4 \times 10^{-4}$) 状态同样光谱吸收系数排列下, MSMGWB 模型计算得到的 k_{nm} 和 k 与真实值的对比结果可以看出, 光谱吸收系数的分组是 MSMGWB 模型计算精度的决定性因素。

式(4)~式(7)组成了 MSMGFSK 模型, 当 $m = 1$ 时, 其退化成 MSFSK 模型^[12]; 当 $n = 1$ 时, 其退化成 MGFSK 模型^[7]; 当 $m = n = 1$ 时, 其退化成为 FSK 模型^[8]。

MSMGWB 模型的构建与上述 MGMGFSK 模型类似, 只不过波数的积分范围从 0 到 ∞ 变成了宽带的波数上下限。本项目建立的宽带模型对应 3~5 μm 红外辐射大气透射窗口, 即其积分波数范围为 2000~3350 cm^{-1} 。

1.2 与灰体壁面发射/反射辐射的兼容

相比原始 MSMGFSK 模型复杂的漫反射灰体固壁边界条件计算方法,本文采用式(8)计算该边界条件:

$$L_{\text{mng},w} = \epsilon \frac{k_{\text{m}}(T_0, \phi_w, g_{\text{m}})}{\lambda_{\text{m}}} a_{\text{m}}(T_w, T_0, \phi_w, g_{\text{m}}) \cdot$$
$$L_{\text{b}}(T_w) + \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_0^{4\pi} L_{\text{mng}} \max(0, -\boldsymbol{n}_w \cdot \boldsymbol{s}) \text{d}\Omega$$

(8)

其中 ϵ 为壁面发射率; $\boldsymbol{n}_w$ 和 $\boldsymbol{s}$ 分别为壁面法向单位向量和辐射传输方向; Ω 为 $\boldsymbol{s}$ 对应的空间立体角。 $\phi_w = (T_w, p_w, x_w)$ 为固壁温度、压力和紧邻固壁网格单元的气体组分摩尔分数。式(8)基于如下理论:当气体 $k_\eta > 0|_{\forall \eta}$ 时,离开无限厚度(H)均匀气体层的辐射光谱与相同温度下黑体的发射辐射光谱完全一致,即

$$\frac{\text{d}L_\eta}{\text{d}s} = k_\eta L_{\text{b}\eta} - k_\eta L_\eta \Rightarrow$$
$$L_\eta = L_{\text{b}\eta}(1 - \text{e}^{-k_\eta H}) = L_{\text{b}\eta} \Big|_{H \rightarrow \infty, L_{\text{b}\eta} = \text{const}, k_\eta > 0}$$

(9)

1.3 光谱吸收系数分组优化状态点的选取

光谱吸收系数的分组方法是 MSMG 多线组模型的核心,其直接决定了上述 MSMGFSK 模型与 MSMGWB 模型的计算精度与适用范围。本文构建的 MSMGFSK 模型用于喷气式飞行器排气系统内部高温燃气的辐射传热特性计算,而 MSMGWB 模型用于上述排气系统尾喷流发射辐射在大气中的远程传输衰减特性计算。因此,为 MSMGFSK 模型光谱吸收系数分组优化选取的气体热力学状态参数点应覆盖高压、常压与低压,而 MSMGWB 模型分组优化状态点的选取只需要覆盖常压和低压;鉴于不同海拔与气象条件下,空气中水蒸气与二氧化碳的摩尔分数变化范围远大于燃气,因此 MSMGWB 模型的分组优化状态点应覆盖更广的水蒸气、二氧化碳摩尔分数,详见表 1。具体的分组优化方法参见文献[9]。

表 1 MSMGFSK 与 MSMGWB 模型光谱吸收系数分组优化状态点

Table 1 Spectral absorption coefficient grouping optimization states of MSMGFSK and MSMGWB models

参数	MSMGFSK	MSMGWB
压力/Pa	4 053, 20 265, 101 325, 506 625	30 397.5, 101 325

续表

参数	MSMGFSK	MSMGWB
温度/K	300~700 K (每隔 100 K 分一组);	300~500 K (每隔 100 K 分一组);
	800~1 600 K (每隔 200 K 分一组);	600~1 000 K (每隔 200 K 分一组);
	1 900~2 500 K (每隔 300 K 分一组)	1 200~1 800 K (每隔 300 K 分一组)
$x_{\text{H}_2\text{O}}/x_{\text{CO}_2}$	0.1, 1.0, 10.0	0.3, 4.5, 70.0

2 气体辐射模型的验证

2.1 准一维辐射传热计算

构造如下准一维气体辐射传热特性计算算例:无限宽度的双层气体夹在冷黑体平板间,两层气体具有不同的热力学状态参数;热气侧(左侧)气体层温度高,厚度(H_{h} (cm))固定,冷气侧(右侧)气体层温度低,厚度(H_{c} (cm))是变化量。计算不同 H_{c} 下到达右侧平板的辐射热流密度(q),并以逐线计算结果(LBL)为基准,验证 FSK 模型与上述 MSMGFSK 模型的计算精度,如图 2 所示。全光谱模型(FSK 模型和 MSMGFSK 模型)参考温度 $T_{\text{ref}} = 1\,300\text{ K}$,宽带模型(WB 模型和 MSMGWB 模型)参考温度 $T_{\text{ref}} = 1\,000\text{ K}$,下同。



图 2 准一维辐射传热算例示意图
Fig. 2 Quasi one-dimensional radiative heat transfer calculation diagram

算例 1 和算例 2 的计算结果如图 3 所示,可以看出在温度分布和参与性组分摩尔分数剧烈变化场合,MSMGFSK 模型的计算精度远高于 FSK 模型,其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,是黑体辐射常数。

2.2 3~5 μm 波段一维辐射传输计算

构造与 2.1 节相似的算例,无限宽度双层或三层气体夹在黑体平板间。对于双层气体,如图 4(a)所示,热气侧(左侧)厚度(H_{h} ,单位:cm)固定,为高温燃气,温度为 T_{h} ;冷气侧(右侧)厚度 H_{c} (单位:cm)变化,为低温环境空气,左右侧黑体平板的温度都是 0 K;对于三层气体,热气侧

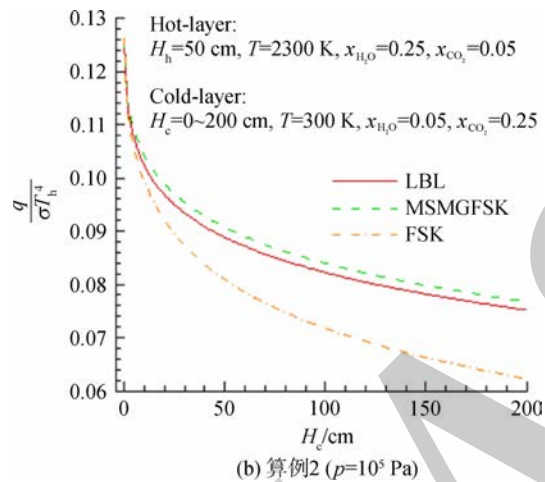
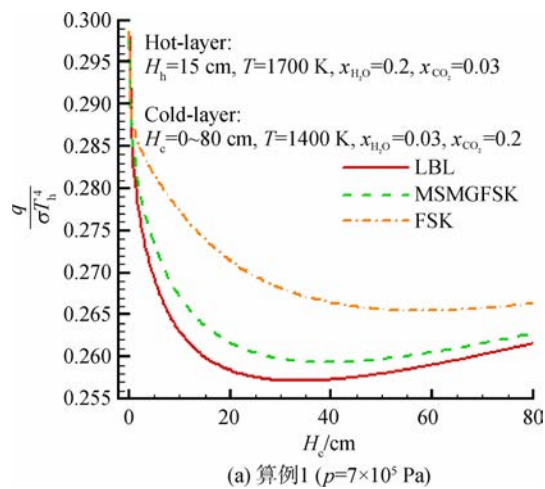


图 3 非均匀 H₂O-CO₂ 混合物辐射传热特性计算结果对比

Fig. 3 Calculation results contrast of radiative heat transfer characteristics of non-uniform H₂O-CO₂ mixture

(左侧)和冷气侧(中间)分别为厚度(H_h 和 H_c (单位:cm))固定的高低温燃气,冷侧为厚度(H_f (单位:km))变化的低温环境空气,左侧黑体平板温度大于0 K,右侧黑体平板的温度 $T_w=0$ K,如图4(b)所示。计算自左向右垂直离开燃气层的 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段辐射亮度($L_{3\sim 5\text{ }\mu\text{m}}$)和环境空气中的传输衰减特性,并以逐线计算结果(LBL)为基准,验证标准宽带谱(WB)模型与上述 MSMGWB 模型的计算精度。对于双层气体情况

$$L_{3\sim 5\text{ }\mu\text{m}} = \int_{2000}^{3350} (1 - e^{-k_{\eta,h}H_h})L_{b\eta}(T_h)e^{-k_{\eta,c}H_c}d\eta \quad (10)$$

图 5 中算例 3~算例 4 的计算结果表明,由于燃气的温度与组分与环境空气差别巨大,WB 模型计算高温燃气发射辐射在大气中的传输衰减会导致不可接受的计算误差,而 MSMG 技术可显著改善该问题。算例 5~算例 6 的计算结果表

明,基于式(8)计算的漫反射固壁边界条件能够完美兼容 MSMGWB 模型。(以上四个算例环境空气的相对湿度分别为 43.6%、43.6%、100%、21%。)

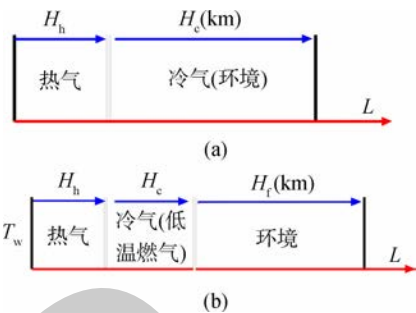
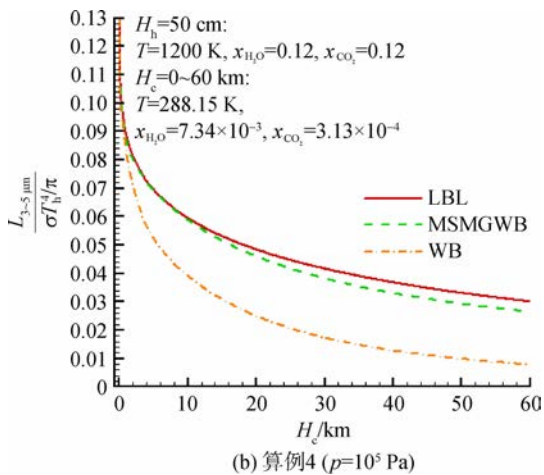
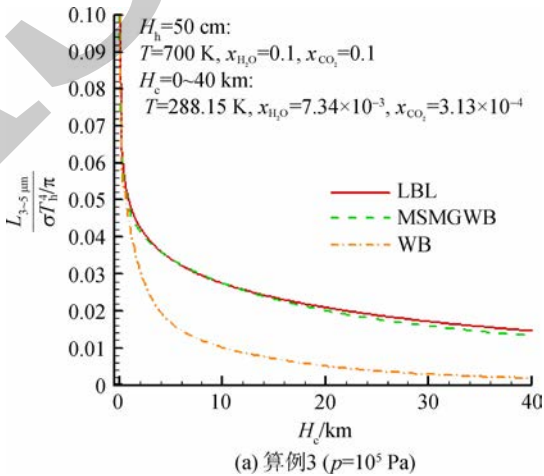
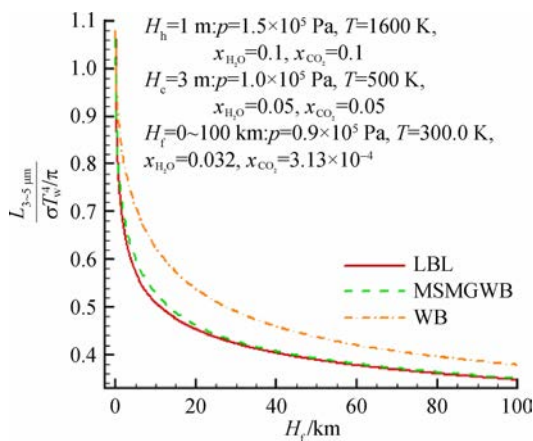


图 4 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段一维辐射传递示意图

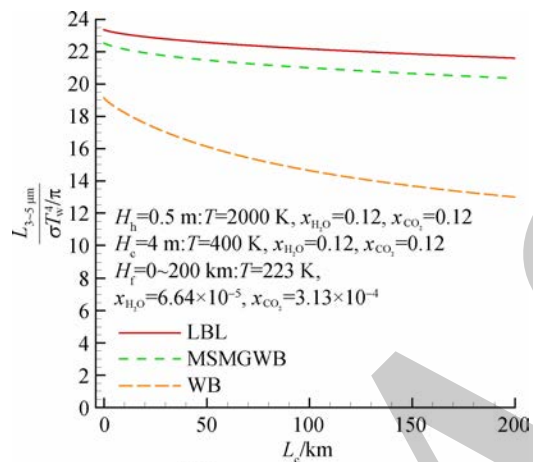
Fig. 4 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ band one-dimensional radiative transfer diagram

六个一维/准一维算例各模型平均相对计算误差(e_{ave})与最大相对计算误差(e_{max})由式(11)和式(12)决定,对比值如表 2。式(11)相对无限宽度的三层气积分范围从 $0\sim H_f$ 即可成立。





(c) 算例5 ($T_w=1200\text{ K}$)



(d) 算例6 ($T_w=500\text{ K}$, $p=0.26\times10^5\text{ Pa}$)

图 5 均匀/非均匀燃气发射辐射在大气中远距离传输衰减特性计算结果对比
($\eta=2000\sim3350\text{ cm}^{-1}$)

Fig. 5 Calculation results contrast of homogeneous/heterogeneous gas emission radiation transmission attenuation characteristic in atmospheric mid-remote distance ($\eta=2000\sim3350\text{ cm}^{-1}$)

表 2 一维/准一维算例各模型平均与最大相对计算误差对比

Table 2 Comparison of average and maximum relative calculation error of each model between one-dimensional and quasi one-dimensional cases

算例	模型	平均相对误差/%	最大相对误差/%
1	MSMGFSK	2.063	2.152
	FSK	11.66	17.19
2	MSMGFSK	0.89	1.61
	FSK	3.52	5.47
3	MSMGFSK	7.24	10.6
	FSK	80.8	92.5

续表

算例	模型	平均相对误差/%	最大相对误差
4	MSMGFSK	7.14	12.0
	FSK	53.5	73.9
5	MSMGFSK	1.40	5.19
	FSK	13.9	24.1
6	MSMGFSK	5.15	5.81
	FSK	32.6	39.9

$$e_{qave} = \frac{\int_0^{H_c} \frac{|\dot{q}_{\text{MSMG/FSK(WB)}} - \dot{q}_{\text{LBL}}|}{q_{\text{LBL}}} dH}{H_c} \times 100\% \tag{11}$$

$$e_{qmax} = \max\left(\frac{|\dot{q}_{\text{MSMG/FSK(WB)}} - \dot{q}_{\text{LBL}}|}{q_{\text{LBL}}}\right) \times 100\% \tag{12}$$

$$e_{Lave} = \frac{\int_0^{H_c} \frac{|L_{\text{MSMG/FSK(WB)}} - L_{\text{LBL}}|}{L_{\text{LBL}}} dH}{H_c} \times 100\% \tag{13}$$

$$e_{Lmax} = \max\left(\frac{|L_{\text{MSMG/FSK(WB)}} - L_{\text{LBL}}|}{L_{\text{LBL}}}\right) \times 100\% \tag{14}$$

3 V形尾缘收缩喷管远程红外成像计算

3.1 几何尺寸与计算参数

V形尾缘收缩喷管由主喷管、隔热屏和外罩组成。主喷管为二段收缩式,两个收缩段的收敛角分别为35°和3.35°,出口直径为791 mm,出口沿周向开有15个V型尾缘以增强喷流和引射气流的掺混;主喷管和隔热屏之间的冷却气流通道高度为9.5 mm,冷却气体从隔热屏的孔洞和出口流出,分别冷却隔热屏自身和主喷管的第二收敛段;主喷管和隔热屏的材质为不锈钢,厚度分别为3 mm和0.8 mm,导热系数为 $9.7+(T-273.15)\cdot0.015\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;喷管外罩最大直径为1054 mm,最大收缩角为11.85°,其在平直段开有环形缝将环境空气引射到主喷管和外罩间的空隙,以冷却主喷管外侧,如图6。

计算工况主喷管的落压比 π (进口总压与环境压力的比)为2.5,主喷管进口燃气的总温为1300 K,由空气(主喷管内只有质量分数为42.9%的空气参与反应)和燃料(C_8H_{16})化学反

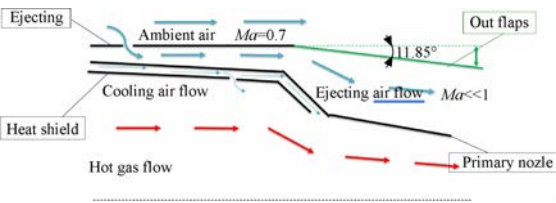


图 6 收缩喷管结构与冷却特性示意图

Fig. 6 Diagram of constraction nozzle structure and cooling characteristics

应生成。隔热屏冷却气的总压比主喷管进口燃气总压高 4%。飞行高度是 7 km,飞行马赫数 $Ma=0.7$ 。红外探测器的高度为 0 km,到喷管的斜线距离为 70 km。图 7 为喷管流场(蓝色)与固体结构温度场(红色)计算网格及其在隔热屏出口附近的局部放大,计算使用了对称面(对于辐射传输方程求解相当于镜面)边界条件,实际计算域仅覆盖 72° 周向。不同高度环境空气的温度压力与组分分布数据来自美国标准大气^[13],详见表 3。

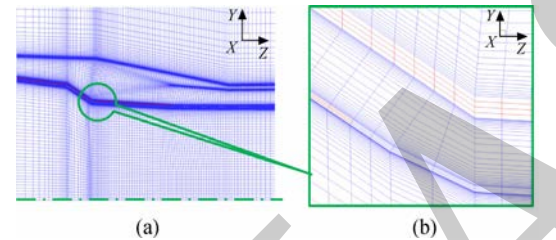


图 7 收缩喷管流场与固体温度场网格及其局部放大

Fig. 7 Grid of constraction nozzle's flow field and the solid temperature field and its partial enlargement

表 3 0~7 km 大气平均热力学参数分布

Table 3 Average thermodynamic parameters distribution in the 0—7 km atmosphere

高度/ km	压力/ kPa	温度/K	$x_{\text{H}_2\text{O}}$	x_{CO_2}
6~7	43.58	245.95	0.000 710	0.000 312
5~6	49.97	252.45	0.001 101	0.000 312
4~5	57.10	258.95	0.001 687	0.000 312
3~4	65.03	265.45	0.002 534	0.000 312
2~3	73.82	271.95	0.003 707	0.000 312
1~2	83.58	278.45	0.005 075	0.000 312
0~1	94.35	284.90	0.006 547	0.000 312

3.2 耦合换热计算结果与分析

本算例基于变比热比流场、燃气组分质量分数场(考虑氮气、氧气、水蒸气、二氧化碳四种组

分)、固体热传导温度场、气体与固体辐射传输-能量场耦合计算预测上述排气系统内外流场热力学参数分布和固体结构温度分布^[14]。

图 8 为计算得到的收缩喷管子午面流场马赫数分布和轴截面水蒸气质量分数($w_{\text{H}_2\text{O}}$)分布(图 8(a)),及隔热屏出口附近的流场温度分布(图 8(b))。可以看出主喷管与外罩之间的区域气流速度非常低,而 V 形尾缘使主喷管高温燃气与低温环境空气掺混形成形状复杂的边界层。随着与收缩喷管出口距离的增大,该边界层的形状与气体热力学参数的分布逐渐趋于轴对称。收缩喷管第一收缩段高温燃气的温度透过隔热屏传递给隔热屏与主喷管所夹通道内的高压冷却空气,使通道一侧的气体温度明显升高。但其从隔热屏出口流出并膨胀加速后仍能形成足够厚的冷却气膜保护收缩喷管的第二收敛段。

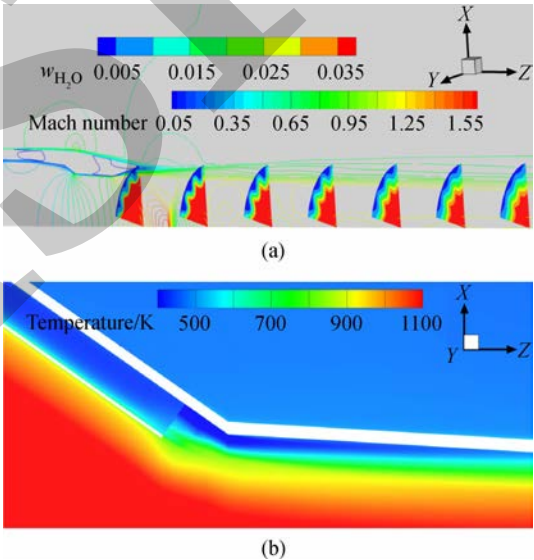


图 8 收缩喷管流场马赫数与温度、水蒸气质量分数分布

Fig. 8 Mach number, temperature, water vapor mass fraction of constraction nozzle flow field

图 9 为只考虑固体辐射和考虑气体和固体辐射计算得到的主喷管与隔热屏结构温度分布。喷管的气体与固体辐射换热计算采用上述 MSMG-FSK 模型和一阶精度有限体积法^[15],空间立体角离散分辨率为 20×10 (喷管圆周角个数 $\times$ 喷管轴向夹角个数),离散的全光谱辐射传输方程系数矩阵采用 BI-CSGTAB(bi-conjugate gradient stabilized method)迭代求解。由于上述各类热防护措施抑制了高温燃气对固壁的对流传热,辐射换热对固体结构温度分布的影响便显现出来。由于高

温燃气的温度高于隔热屏和主喷管内表面,忽略前者的辐射传热显然会导致计算得到的固壁内侧热流密度与总体温度偏低,并间接影响到整个喷管远程红外特性的计算精度。

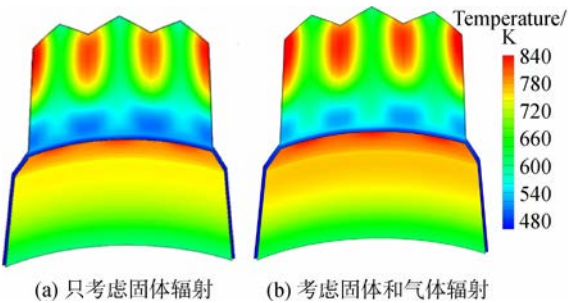


图 9 主喷管和隔热屏结构温度分布计算结果
Fig. 9 Calculation results of primary nozzle and heat insulation screen structure's temperature distribution

图 10 为考虑气体辐射与否计算得到的主喷管与隔热屏内壁面净辐射热流密度(q_r):

$$q_r = \epsilon \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_0^{4\pi} L_{mng} \max(0, -\mathbf{n}_w \cdot \mathbf{s}) d\Omega - \sigma T_w^4 \right]$$

(15)

可以看出高温燃气(图 10(b))明显加大了主喷管内壁所有位置处的辐射热负荷。主喷管出口高温区净辐射热流密度为负值的原因是高温固壁的辐射发射到喷管外的环境空气中,而后者对喷管内壁的辐射可忽略不计。

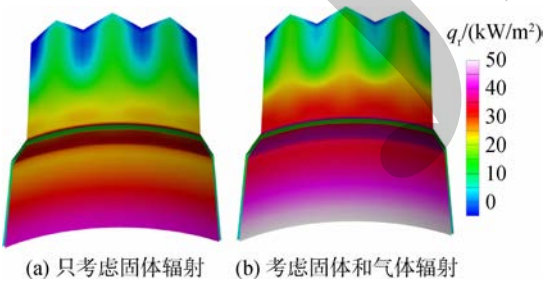


图 10 主喷管与隔热屏内壁净辐射热流密度
Fig. 10 Net radiation heat flux density of primary nozzle and insulation screen

图 11 为主喷管内壁面的对流换热热流密度 q_c ,对比图 10 可以看出由于冷却气膜的隔离作用,高温喷流与主喷管/隔热屏内壁的表面传热系数大幅降低,达到与辐射热流密度相同的量级。在隔热屏出口(靠近喉道的喷管扩张段)冷却气膜厚度较大且未开始扩散的位置,对流热通量甚至

为负,表明透过气膜的辐射传热使该位置固壁的温度高于当地气膜的总温,为达到热平衡固壁向冷却气膜传热。

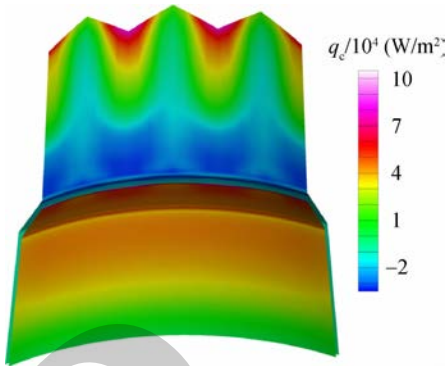


图 11 主喷管内壁面对流换热热流密度
Fig. 11 Convective heat exchange heat flux density of nozzle inner wall

3.3 3~5 μm 波段辐射特性计算结果与分析

本文排气系统 3~5 μm 波段远程辐射特性计算分为三步骤:首先基于上述流场固体温度场计算结果,采用有限体积法计算固壁的反射辐射特性;之后以上述反射辐射作为初值,采用射线追踪算法^[16]计算喷管的近距离红外成像;最后计算上述红外图像在空气中的远程传输衰减特性。成像的方向与喷管轴线成 45°角,成像的像素分辨率为 1700 像素×80 像素。图 12 为计算得到的喷管近距离与 70 km 远距离红外图像及其局部放大,可以看出固体壁面的 3~5 μm 波段发射辐射亮度 L (单位:W/(m²·sr))比相同温度下燃气的发射辐射亮度高出很多,同时前者在大气中的传输衰减速度也远低于后者。

图 13 为忽略固壁反射辐射时,MSMGWB 模型与 LBL 模型 3~5 μm 波段红外成像计算结果的对比(由于 LBL 模型的计算量过于巨大,考虑固壁反射时的计算开销难以负担),MSMGWB 模型的计算误差定义为 $\frac{L_{s,MSMGWB} - L_{s,LBL}}{L_{s,LBL}} \times 100\%$ 。

可以看出 MSMGWB 模型对高温喷流辐射的总体计算误差在 7%左右,只有喷管出口附近很少一小部分区域的计算误差达到 9%;对固体辐射远距离传输衰减特性的计算误差不超过 4%,因此胜任航空燃气轮机排气系统的远程红外特性计算。对比图 12(b)和图 13(a)可以发现,固壁反射辐射对主喷管上游内壁面的辐射强度影响显著。

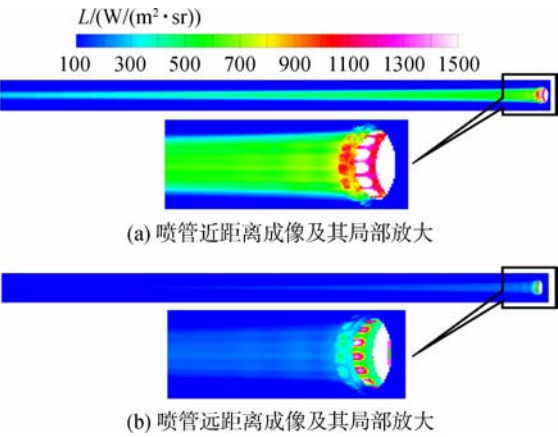


图 12 喷管近距离与远距离 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段红外成像及其局部放大

Fig. 12 $3\sim5\mu\text{m}$ wave band close and distant infrared imaging of nozzle and its partial enlargement

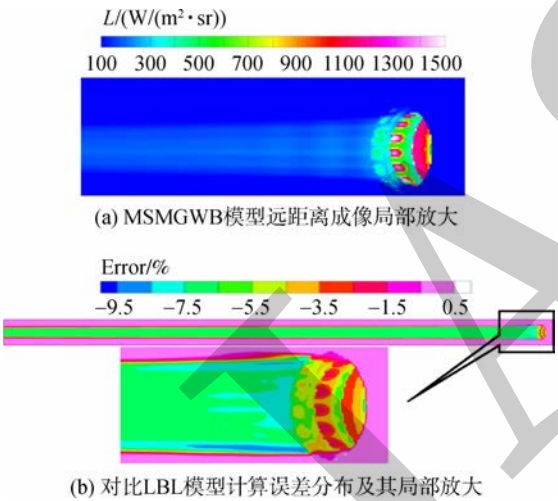


图 13 忽略固壁反射时,MSMGWB 模型的 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段红外成像计算结果及其对比 LBL 模型的计算误差分布图与局部放大图

Fig. 13 Ignore the solid wall reflection, $3\sim5\mu\text{m}$ wave band calculation results of MSMGWB model band infrared imaging and error distribution of calculation comparison to LBL model and its partial enlargement

4 结 论

本文将之前用于 FSK 模型的多线组技术应用用于 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段 WB 模型,并针对碳氢燃料高温燃气发射辐射在不同环境空气中的远程传输衰减特性计算,调整了后者的光谱吸收系数分组优化状态点。以此建立了 MSMGWB 模型及其兼容灰体固壁发射/反射辐射的边界条件,并对无限

宽度多层气体的辐射传热/远程红外特性,真实尺寸、带热防护装置航空燃气轮机排气系统的耦合换热特性和 70 km 红外成像特性进行了数值模拟。结果表明:

- 1) MSMG 技术可大幅提升 WB 模型对高温喷流远程红外特性的计算精度,从而可用于真实结构复杂排气系统的远程红外成像预测;
- 2) 对于带有热防护装置的高温排气系统,气体辐射传热对其高温部件结构温度分布的影响不能忽略;
- 3) $3\sim5\mu\text{m}$ 波段高温燃气发射辐射在大气中的衰减速度远高于同波段相近温度的固体辐射。

参考文献:

[1] HARTMANN J M, LEON R L D, TAINE J. Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for H_2O [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1984, 32(2): 119-127.

[2] PIERROT L, SOUFIANI A, TAINE J. Accuracy of narrow-band and global models for radiative transfer in H_2O , CO_2 , and $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mixtures at high temperature[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1999, 62(5): 523-548.

[3] MODEST M F, ZHANG H. The full-spectrum correlated- k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(1): 30-38.

[4] SHI Guangyu, XU Na, WANG Biao, et al. An improved treatment of overlapping absorption bands based on the correlated k -distribution model for thermal infrared radiative transfer calculations[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(8): 435-451.

[5] RIVIERE P, SOUFIANI A, TAINE J. Correlated- k and fictitious gas model for H_2O infrared radiation in the voigt regime[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1995, 53(3): 335-346.

[6] WANG L, MODEST M F. Narrow-band based multiscale full-spectrum k -distribution method for radiative transfer in inhomogeneous gas mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(32): 740-748.

[7] ZHANG H, MODEST M F. Scalable multi-group full-spectrum correlated- k distributions for radiative transfer calculations[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(3): 454-461.

[8] MODEST M F. Narrow-band and full-spectrum k -distributions for radiative heat transfer-correlated- k vs. scaling approximation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 76(1): 69-83.

[9] PAL G, MODEST M F. A new hybrid full-spectrum correlated k -distribution method for radiative transfer calculations in nonhomogeneous gas mixtures[R]. ASME Paper

HT2007-32673,2007.

[10] PAL G, GUPTA A, MODEST M F, et al. Comparison of accuracy and computational expense of radiation models in simulation of non-premixed turbulent jet flames[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2487-2495.

[11] PAL G, MODEST M F. A narrow band-based multiscale multigroup full-spectrum k -distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous gas-soot mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 291-303.

[12] ZHANG H, MODEST M F. A multi-scale full-spectrum correlated k -distribution for radiative heat transfer in inhomogeneous gas mixtures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 73(2): 349-360.

[13] ELLIS J O, HULL A R, QUIROZ R S, et al. U S. Standard atmosphere[R]. NASA TMX-74335, 1976.

[14] HU Haiyang, BAI Peng, WANG Qiang. High efficient numerical simulation of infrared radiation from a hot exhaust nozzle [J]. Communications in Computational Physics, 2012, 11(4): 1182-1204.

[15] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.

[16] COIRO E, CHATELARD C, DURAND G, et al. Experimental validation of an aircraft infrared signature code for commercial airliners[R]. AIAA-2012-3190, 2012.

(编辑:陈 越)