

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.009

散射对高温气体-碳黑颗粒混合物辐射传输的影响

梁 栋^{1,2}, 贺振宗¹, 毛军逵¹, 徐 梁¹, 付 尧²

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京, 211106)

摘要: 基于全光谱 k 分布 (Full spectrum k distribution, FSK) 模型、MIE 理论和有限体积法 (Finite volume method, FVM), 构建了均温、均质辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物介质热辐射传输模型, 并分析了碳黑不同尺寸、不同体积浓度以及介质不同路径长度和不同温度条件下, 因忽略碳黑颗粒散射所导致的介质热辐射传输特性 (如辐射热流、辐射源项) 的计算误差。研究结果表明: 体积分数不变, 增大粒径, 计算误差呈现出先增大后减小的趋势; 数密度不变, 增大粒径, 或者粒径不变, 增大体积分数, 均将使得计算误差相应增大; 粒径、体积分数不变, 增大路径长度, 或者升高介质温度, 均将增大计算误差。通常对于含有大颗粒、高碳黑浓度的辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物介质, 碳黑颗粒散射不能忽略。

关键词: 热辐射传输; 碳黑颗粒散射; FSK 模型; 气体-碳黑颗粒混合物; MIE 理论

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)04-0588-10

Influence of Scattering Effect of Soot on Radiative Transfer in High Temperature Gas-Soot Mixtures

LIANG Dong^{1,2}, HE Zhenzong¹, MAO Junkui¹, XU Liang¹, FU Yao²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing, 211106, China)

Abstract: The full spectrum k distribution (FSK) model, MIE theory and finite volume method (FVM) are applied to construct the radiation transfer model in the isothermal and homogeneous high temperature gas-soot mixtures. Under different soot sizes, different soot volume fractions, different path lengths and different temperatures, the calculated errors of radiative heat transfer properties (such as the radiative heat flux and radiative source term) due to neglecting the soot scattering effect are studied. The research results reveal that when increasing the soot size with the soot volume fraction unchanged, the calculated errors will increase first and then decrease. When increasing the soot size with the soot particle number density unchanged or increasing the volume fraction with the soot size unchanged, the calculated errors will increase monotonously. When the soot size and the volume fraction unchanged, increasing the radiative heat transfer path length or increasing the medium temperature, the calculated errors will also increase monotonously. Therefore, for high temperature gas-soot mixtures with large particles or large soot volume fraction, the soot scattering should not be ignored.

Key words: radiative heat transfer; soot scattering; FSK model; gas-soot mixtures; MIE theory

热辐射传输在诸如航空发动机燃烧室、燃气轮机燃烧室以及内燃机燃烧室等高温燃烧设备传热过程中占据主导地位^[1]。热辐射传输现象主要发生在碳氢燃料燃烧产生的辐射参与性气体(主要

基金项目: 航空科学基金(201928052002, 2017ZC09002)资助项目; 江苏省自然科学基金-青年基金(BK20170800)资助项目。

收稿日期: 2019-03-10; **修订日期:** 2019-05-05

通信作者: 贺振宗, 男, 博士, 副教授, E-mail: hezhonzong@nuaa.edu.cn。

引用格式: 梁栋, 贺振宗, 毛军逵, 等. 散射对高温气体-碳黑颗粒混合物辐射传输的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 588-597. LIANG Dong, HE Zhenzong, MAO Junkui, et al. Influence of scattering effect of soot on radiative transfer in high temperature gas-soot mixtures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 588-597.

包括 H_2O , CO_2) 和固体颗粒(如碳黑颗粒、飞灰等)组成的混合物与燃烧室壁面之间。研究表明:典型电站煤粉锅炉炉膛中辐射换热占到总换热量的 90% 以上^[2];在燃气轮机燃烧室内辐射热流可以占到燃烧室壁面总热流的 20%~30%^[3],辐射换热会导致燃气轮机叶片温度提高约 40 K^[4]。尤为重要的是,燃烧过程产生的碳黑颗粒可以在红外光谱区强烈地发射辐射能,发射能力远远强于气体的发射能力^[5-6]。煤粉炉内碳黑颗粒可以强化炉内辐射热量交换,造成约 300 K 的温度变化和 10%~15% 的辐射热流计算偏差^[7-9]。为了进一步研究燃烧室内温度分布和燃烧状态以及污染物生成与排放,传热表面的设计和防护,建立准确、高效的辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射传输模型具有重要意义^[10]。

气体辐射特性模型分为逐线法(Line by line, LBL)^[11-12]、谱带模型(Band model, BM)^[13]和全光谱模型(Global model, GM)^[13]。逐线法计算结果最精确,需要大量计算资源,一般作为近似模型精确性评价标准。谱带模型分为窄谱带模型和宽谱带模型,谱带模型相对于逐线法,提高了计算效率,但是,谱带模型只能耦合在积分形式的辐射传输方程中,无法与离散坐标法(Discrete ordinate method, DOM)、有限体积法(Finite volume method, FVM)、有限元法(Finite element method, FEM)等微分形式的辐射传输方程求解方法进行耦合。全光谱模型主要包括:灰气体加权(Weighted sum of gray gases, WSGG)模型^[13-14]、基于谱线的灰气体加权(Spectral line based weighted sum of gray gases, SLW)模型^[15]、全光谱 k 分布(Full spectrum k distribution, FSK)模型^[13, 16]等。其中,WSGG 模型和 FSK 模型可以同时兼具计算效率和计算精度,应用最为广泛。但是 WSGG 模型引入灰气体假设,丧失了气体光谱辐射特性,且其权重系数只适用于特定气体分压比,无法计算任意比例混合气体辐射特性,因而在应用中受到限制。全光谱 k 分布模型由 Modest 首次提出,经过 Modest 和 Zhang^[16-17]改进并推广到辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物的辐射计算当中,推进了 FSK 方法的工程应用。FSK 模型适用于任意比例的混合气体,保留了辐射光谱特性,可以与多种形式的辐射传输方程耦合求解,并且该方法只需要针对少量的光谱吸收系数进行高斯积分数值计算,极大地提高了计算效率。

针对颗粒辐射问题的研究在近几十年内得到了快速发展,包括单个颗粒辐射特性计算方法,如 Rayleigh 理论、MIE 理论以及 T -矩阵等,以及颗粒聚集体辐射特性计算方法,如多体 T -矩阵^[18]、广义

MIE(Generalized multi-particle MIE, GMM)理论^[19]等。从现有对辐射参与性气体-颗粒混合物辐射传热特性的研究来看,一般对于尺度参数远远小于 1 的微小颗粒通常采用 Rayleigh 理论^[20]来计算碳黑颗粒的吸收系数而忽略其散射,这样会极大地简化计算,但是会带来较大的计算误差;对于尺度参数大于 1 的碳黑颗粒辐射特性问题研究多基于 MIE 理论方法,如 Trivic^[21]结合 MIE 理论和 WSGG 模型,通过区域法和蒙特卡洛法两种方法计算了气-粒混合物的辐射传输特性,并且得到了较为一致的结果;Johansson 等^[6]通过统计窄谱带方法结合 MIE 理论研究富氧燃烧辐射问题时发现无散射假设相较于各向异性散射会高估局部壁面热流;Marakis 等^[22]认为真实情况的各向异性散射需要大量的计算资源,通常采用各向同性散射和忽略散射两种假设进行近似处理,并利用 MIE 理论通过 $P-1$ 和蒙特卡洛两种方法对比并分析了颗粒无散射假设和各向同性散射假设所带来的误差,结果表明,无散射假设的计算结果相较于各向同性散射更接近于真实的各向异性散射,但两者都会带来显著的计算误差,并且随着运行压力的提高,必须考虑颗粒的散射特性对于辐射传热的影响。

尽管忽略散射可以极大地简化碳黑颗粒辐射特性计算,但是对于不同的工况,直接忽略掉碳黑颗粒的散射会带来较大的计算误差,本文重点关注不同工况下,因为忽略碳黑颗粒散射而对辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射传热特性造成的影响。研究过程中,假设碳黑颗粒单个分散,且独立散射占优,利用 Chang 等^[23]计算碳黑颗粒复折射率的关联式,采用 MIE 理论计算碳黑颗粒的光谱散射系数、光谱吸收系数以及散射相函数,并参考高温气体全光谱 k 分布模型,进行光谱重排,简化了碳黑颗粒光谱辐射特性的计算。本文研究算例中, H_2O 和 CO_2 的摩尔浓度保持不变,重点研究了:(1) 相同体积分数 f_v 或相同颗粒数密度 N , 不同粒径;(2) 粒径 $D=0.5 \mu m$, 不同体积分数;(3) 粒径 $D=0.5 \mu m$, 体积分数 $f_v=2.0 \times 10^{-6}$, 不同路径长度及不同介质温度, 5 种工况条件下辐射特性变化规律以及因为忽略碳黑颗粒散射所导致的辐射热流和辐射源项的计算误差,分析了原因,并对于不同工况下能否忽略碳黑颗粒的散射给出了建议。

1 辐射传输方程

对于吸收、发射和散射的辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物而言,辐射强度的变化由混合物发射、吸收以及从方向 \hat{s} 散射出去和散射进入方向 \hat{s}

的辐射能之和决定。由于气体的散射系数非常小,散射可以忽略不计。因此,一维辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射传输方程可以写成

$$\frac{dI_\eta}{ds} = (\kappa_{g\eta} + \kappa_{p\eta})I_{b\eta} - (\kappa_{g\eta} + \kappa_{p\eta} + \sigma_{p\eta})I_\eta + \frac{\sigma_{p\eta}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\eta(s') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega' \quad (1)$$

边界条件为

$$I_\eta = \epsilon_w I_{bw\eta} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{s' \cdot n < 0} I_\eta |s' \cdot n| d\Omega' \quad (2)$$

式中: I_η 为光谱辐射强度; η 为波数; $I_{b\eta}$ 为普朗克函数; $\kappa_{g\eta}$ 为H₂O和CO₂组成的混合气体的光谱吸收系数; $\kappa_{p\eta}$ 为碳黑颗粒的光谱吸收系数; $\sigma_{p\eta}$ 为碳黑颗粒的光谱散射系数; Φ 为辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物的散射相函数; Ω 为立体角; ϵ_w 为壁面发射率。H₂O, CO₂的光谱吸收系数通过逐线法^[11-12]获取。碳黑颗粒的光谱散射系数、光谱吸收系数和散射相函数可以通过MIE理论得到,计算过程中碳黑颗粒的光谱复折射率参考Chang等^[23]的研究成果为

$$\begin{aligned} n_\lambda &= 1.811 + 0.1263 \ln \lambda + 0.027 \ln^2 \lambda + 0.0417 \ln^3 \lambda \\ k_\lambda &= 0.5821 + 0.1213 \ln \lambda + 0.2309 \ln^2 \lambda - 0.01 \ln^3 \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

式中: n_λ 和 k_λ 分别为碳黑颗粒的折射指数和吸收指数。根据文献[24-25],本文所有算例中碳黑颗粒辐射特性参数计算波长范围设定为0.1~12 μm。通过式(4)和式(5)可以计算出均匀粒径颗粒群的吸收系数 $\kappa_p(\lambda)$ 和散射系数 $\sigma_p(\lambda)$ ^[26]有

$$\kappa_p(\lambda) = \frac{3}{2} \cdot \frac{f_v}{D} \cdot Q_{\text{abs}}(\lambda) \quad (4)$$

$$\sigma_p(\lambda) = \frac{3}{2} \cdot \frac{f_v}{D} \cdot Q_{\text{sca}}(\lambda) \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{abs}}(\lambda)$ 为碳黑颗粒吸收因子, $Q_{\text{sca}}(\lambda)$ 为碳黑颗粒散射因子,两者均由MIE理论得到。

2 全光谱 k 分布模型

全光谱 k 分布模型的基本思想是重排理论,即:如果在某一较小光谱间隔内普朗克函数仅仅发生微小变化时,可以将随波数剧烈变化的气体光谱吸收系数按其数值大小进行重新排列,并根据吸收系数出现的概率进行统计,从而获得气体光谱吸收系数在该光谱间隔内出现的概率分布函数,该函数通常被称为累积 k 分布函数;但是由于在全光谱范围内,普朗克函数会出现巨大变化,为了消除假定普朗克函数不变所带来的计算误差,需要在累积 k 分布函数中引入普朗克函数权重。

依据全光谱 k 分布模型可知,在均匀温度、均匀浓度环境中,带有普朗克权重的全光谱 k 分布函数可以表示为

$$f(k, T) = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty I_{b\eta} \delta(k - \kappa_\eta) d\eta = \sum_i \frac{I_{b\eta_i}}{I_b} \left| \frac{d\eta}{d\kappa} \right| \quad (6)$$

式中: k 可以是介质在温度为 T 时的光谱吸收系数、光谱散射系数等辐射特性参数; $\delta(x)$ 为狄拉克函数(Dirac function),定义如下

$$\delta(x) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & |x| > \delta \\ 1/(2\delta) & |x| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

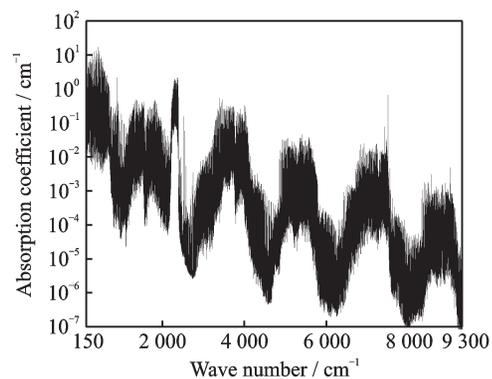
全光谱辐射特性参数的累积 k 分布函数为

$$g(\kappa) = \frac{1}{I_b} \int_0^k \int_0^\infty I_{b\eta} \delta(k - \kappa_\eta) d\eta d\kappa \quad (8)$$

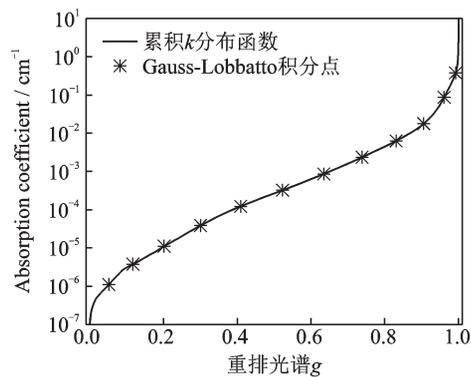
该函数表示小于 k 值的辐射特性参数对应波数间隔内普朗克函数份额占黑体辐射强度比重, $0 \leq g \leq 1$,累积 k 分布函数满足

$$\int_0^1 g(\kappa) dg = 1 \quad (9)$$

对式(8)求反函数,即可得到如图1所示的辐射特性参数随累积 k 分布函数 g 变化的单调递增曲线(温度 $T=1000$ K,总压 p_{tot} 为1个标准大气压, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 及 p_{CO_2} 均为0.1个标准大气压)。对式(1)和式(2)两端同时乘以狄拉克函数并在全光谱积分后,再同时



(a) Spectral absorption coefficient of H₂O and CO₂ mixture



(b) Reordered spectral absorption coefficient of H₂O and CO₂ mixture
图1 H₂O和CO₂混合气体的光谱吸收系数和光谱重排后的吸收系数

Fig.1 Spectral absorption coefficient and reordered spectral absorption coefficient of H₂O and CO₂ mixture

除以 k 分布函数 $f(k, T)$, 即可得到

$$\frac{dI_g}{ds} = (\kappa_g + \kappa_a)(I_b - I_g) - \sigma_p \left(I_g - \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I_g(\hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega' \right) \quad (10)$$

$$I_{wg} = \epsilon_w a(T_w, T, g) I_{bw} + (1 - \epsilon_w) \frac{1}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} I_g | \hat{n} \cdot \hat{s} | d\Omega \quad (11)$$

式中: κ_g, κ_a 和 σ_p 分别为重排后的气体吸收系数, 颗粒吸收系数以及颗粒散射系数。

$$I_g = \int_0^\infty I_\eta \delta(k - \kappa_\eta) d\eta / f(k) \quad (12)$$

$$a(T_w, T, g) = \frac{f(T_w, k)}{f(T, k)} = \frac{dg_w(T_w, k)}{dg(T, k)} \quad (13)$$

式中: a 一般称为非灰拉伸系数, 是壁面温度与介质温度之间的函数。

总辐射强度可以通过在重排光谱 g 空间利用高精度求积方法获得, 即有

$$I = \int_0^\infty I_\eta d\eta = \int_0^1 I_g dg = \sum_{i=1}^N \omega_i I_{g_i} \quad (14)$$

式中: ω_i 为积分点权重; I_{g_i} 为积分点 g_i 处的辐射强度。文献[27]认为, 利用 Gauss 积分求解辐射传输方程时, 一般 8~16 个积分节点就可以得到足够精确的结果; 文献[28]采用 12 点 Gauss 积分计算辐射传输方程时最大误差不超过 4%。因此, 辐射热流以及辐射源项可以通过 12 点 Gauss-Lobatto 积分分别表示为

$$q_{tot} = \int_0^1 \int_{4\pi} I_g(\hat{s} \cdot \hat{n}) d\Omega dg = \sum_{i=1}^N \omega_i \int_{4\pi} I_{g_i}(\hat{s} \cdot \hat{n}) d\Omega \quad (15)$$

$$\nabla \cdot q_{tot} = \int_0^1 \nabla \cdot q_g dg = \sum_{i=1}^N \omega_i \kappa_{g_i} [4\pi I_b - G_{g_i}] \quad (16)$$

式中: $N=12$; G_{g_i} 为积分点 g_i 处的入射辐射力。为验证 FSK+FVM 方法的可行性, 本文采用文献[29]计算工况, 计算得到一维平板间 H_2O 和 CO_2 混合物在 $T=1\ 000\ K, P_{H_2O}:P_{CO_2}=0.1:0.8, L=10\ m$ 时局部辐射热流和源项分布, 结果对比如图 2 所示, 辐射热流和辐射源项最大误差分别为 14.6% 和 15.7%, 证明本文 FSK+FVM 方法与文献[29]采用的 LBL+DOM 方法得到的结果吻合较好, FSK+FVM 方法计算辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射特性是可靠的。

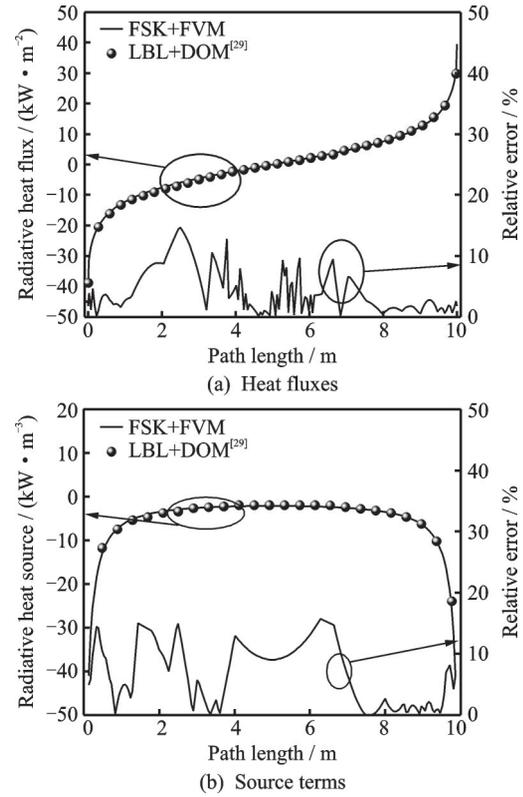


图 2 FSK+FVM 方法与 LBL+DOM^[29] 方法在计算一维平板间辐射热流和源项结果对比

Fig.2 Comparison between FSK+FVM and LBL+DOM^[29] in studying radiative heat fluxes and source terms in 1-D plate

3 数值计算及结果分析

3.1 计算工况

本文研究了表 1 所示工况下, 一维平行平板间的辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射换热特性。所有工况中混合物总压为 1 个标准大气压, H_2O 和 CO_2 的分压均为 0.1 个标准大气压, N_2 分压为 0.8 个标准大气压。碳黑颗粒体积分数较小, 认为不占有体积份额, 两平板温度为 0 K, 黑体壁面条件, 该壁面条件广泛应用于评价平板间距、介质温度和介质浓度等条件对计算结果的影响^[30-31]。实际火焰中碳黑颗粒粒径一般在 30 nm 到 120 nm 之间, 因此将 0.05, 0.1 μm 作为不考虑碳黑颗粒聚集时具有代表性的粒径; 在火焰中碳黑颗粒往往以

表 1 各工况计算条件

Table 1 Calculation conditions for different cases

工况	$f_v/10^{-6}$	N/m^{-3}	$D/\mu m$	T/K	L/m
1	2.0	—	0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 3.0	1 000	1.0
2	—	1.416×10^{11}	0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 3.0	1 000	1.0
3	5.0, 2.0, 1.0, 0.1, 0.01	—	0.5	1 000	1.0
4	2.0	—	0.5	1 000	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
5	2.0	—	0.5	800, 1 000, 1 500, 2 000	1.0

分形聚集形态出现,通常采用等体积球或者等表面积球假设进行简化计算,因此将0.5,1.0,3.0 μm作为考虑炭黑颗粒聚集状态下采用等效球假设时具有代表性的粒径。

3.2 相同体积分数,不同粒径对辐射传输的影响

图3和图4分别给出了体积分数 $f_v=2.0 \times 10^{-6}$, $T=1\ 000\ K$, $L=1.0\ m$ 时,粒径 $D=0.05, 0.1, 0.5, 1.0$ 和 $3.0\ \mu m$ 5种不同粒径下(工况1),辐射热流、辐射源项的分布情况以及因为忽略炭黑颗粒散射而引起的误差。当粒径等于 $0.05\ \mu m$ 和 $0.1\ \mu m$ 时,忽略炭黑颗粒散射而引起的计算误差非常小,可以忽略不计。随着炭黑粒径逐渐增大,忽略炭黑颗粒的散射,会高估辐射热流;因忽略炭黑颗粒散射而引起的计算误差呈现出先增大再减小的趋势,并且在 $D=1.0\ \mu m$ 时,最大误差分别为26.4%和26.3%。造成该现象的原因首先可能是粒径增大,单个颗粒辐射特性一般会相应增加,但是当体积分数不变时,粒径增大又会导致炭黑颗粒数密度减小,可能会造成整个颗粒系辐射特性参数的减小;其次,入射波段一定,炭黑粒径变化引起尺度参数的变化,造成炭黑颗粒光谱吸收系数、光谱散射系数以及散射相函数等辐射特性参数的变化,进而造成热流和源项的改变。图5给出了不同炭黑粒径下,经光谱重排后炭黑颗粒的散射系数 k 随重排光谱的变化规律。 $D=1.0\ \mu m$ 时的散射系数大于其

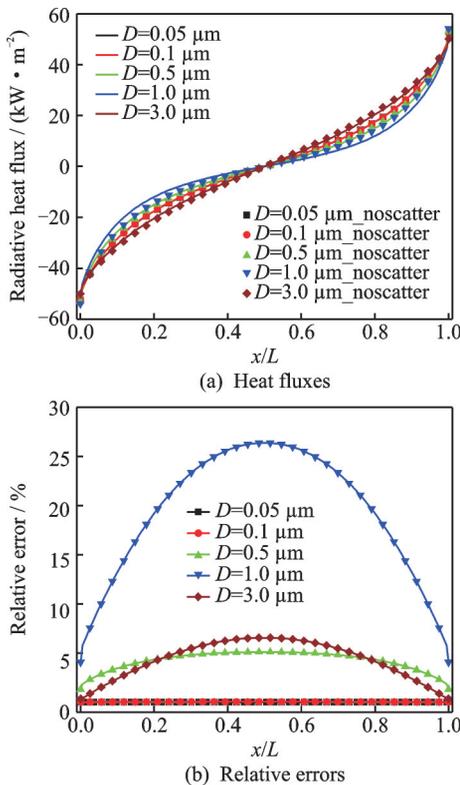


图3 不同粒径下辐射热流及其误差(工况1)

Fig.3 Heat fluxes and their relative errors under different soot particle sizes (Case 1)

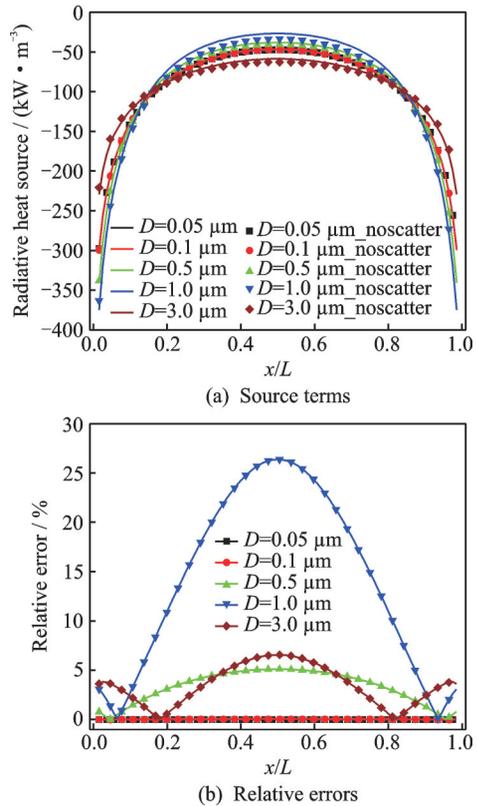


图4 不同粒径下辐射源项及其误差(工况1)

Fig.4 Source terms and their relative errors under different soot particle sizes (Case 1)

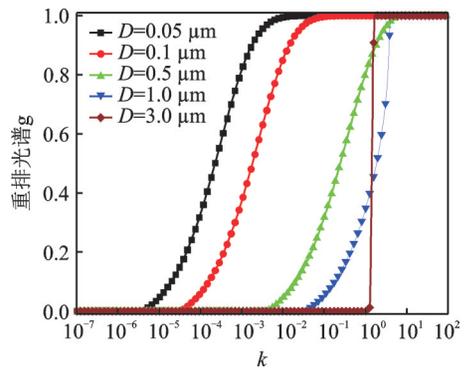


图5 不同粒径光谱重排后的散射系数

Fig.5 Scattering coefficient of soot after spectral reorder under different sizes

他粒径下的散射系数,因此在 $D=1.0\ \mu m$ 时,因为忽略炭黑颗粒散射而造成的计算误差最大。该现象说明:体积分数不变,粒径变化时,因忽略炭黑颗粒散射而对热辐射传输造成的影响并不是单调的,因此在判断炭黑颗粒散射能否被忽略时,不能单纯依靠粒径大小来决定。

3.3 相同数密度、不同粒径对辐射传输的影响

图6和图7分别给出了 $T=1\ 000\ K$, $L=1.0\ m$, 炭黑颗粒数密度 $N=1.416 \times 10^{11}\ m^{-3}$ 时,粒径 $D=0.05, 0.1, 0.5, 1.0$ 和 $3.0\ \mu m$ 5种炭黑粒径下(工况2),辐射热流和辐射源项的分布及其因为忽略炭黑

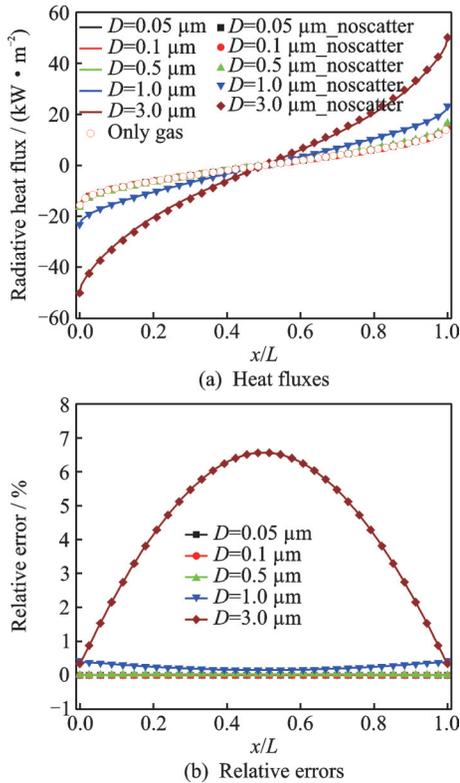


图 6 不同粒径下辐射热流及其误差(工况 2)

Fig.6 Heat fluxes and their relative errors under different soot sizes (Case 2)

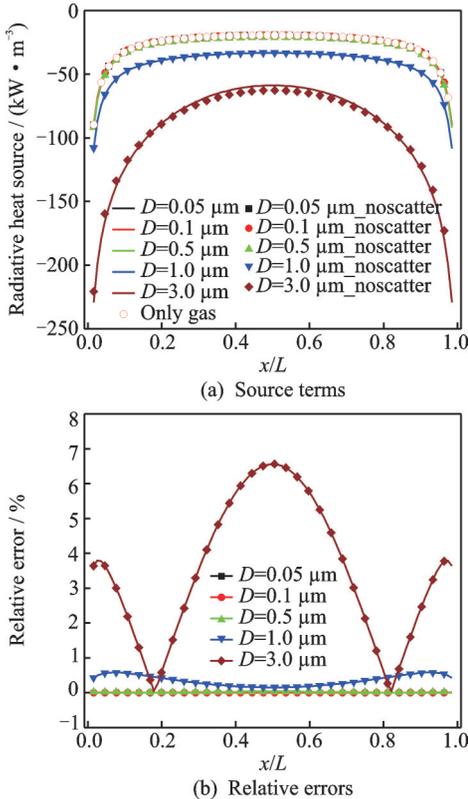


图 7 不同粒径下辐射源项及其误差(工况 2)

Fig.7 Source terms and their relative errors under different soot sizes (Case 2)

散射所带来的计算误差。如图 6 和图 7 所示,碳黑颗粒数目保持不变,当 $D=0.05 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$ 时,

碳黑颗粒的吸收和散射对辐射传输的影响都非常小。但是随着碳黑粒径进一步增大,碳黑体积分数随之增大,局部辐射热流和辐射源项迅速增大,碳黑粒径由 $0.5 \mu\text{m}$ 增大到 $3.0 \mu\text{m}$,壁面辐射热流由 16.5 kW/m^2 增长到 50.3 kW/m^2 ,因为忽略碳黑颗粒散射而对辐射热流和辐射源项造成的最大误差分别由 0.03% 和 0.029% 增长到 6.6% 和 6.5% 。该现象表明,碳黑颗粒数密度不变,粒径增大,碳黑颗粒的吸收和散射对辐射传输的影响不断增大,忽略散射对于辐射传输造成的误差也不断增大。因此,数密度不变,粒径越大,碳黑颗粒散射对辐射传输的影响就越不能忽略。

3.4 相同粒径,不同体积分数对辐射传输的影响

图 8 和图 9 分别给出碳黑颗粒粒径 $D=0.5 \mu\text{m}$, $T=1\ 000 \text{ K}$, $L=1.0 \text{ m}$ 时, $f_v=5.0 \times 10^{-6}$, 2.0×10^{-6} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} 和 1.0×10^{-8} 5 种体积分数下(工况 3),辐射热流和辐射源项的分布以及因为忽略碳黑颗粒散射所造成的计算误差。如图 8 和图 9 所示, $f_v=1.0 \times 10^{-8}$ 时,碳黑颗粒的吸收和散射对辐射传输的影响非常小,几乎可以忽略不计。但是随着体积分数, f_v 由 1.0×10^{-8} 增大到 5.0×10^{-6} ,壁面辐射热流由 16.6 kW/m^2 增长到 54.3 kW/m^2 ,因为忽略碳黑颗粒散射而对辐射热流和源项造成的最大误差分别由 0.032% 和 0.031% 增长到 5.6% 和 5.7% 。此现象表明,粒径不变,体积分数

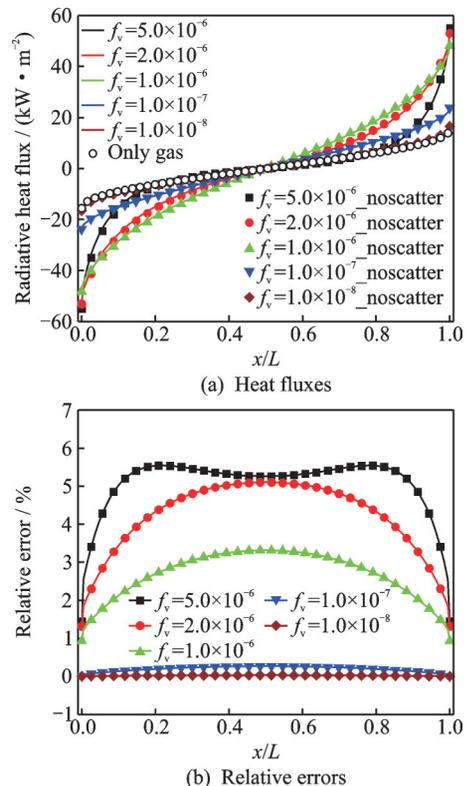


图 8 不同体积浓度 f_v 条件下辐射热流及其误差(工况 3)

Fig.8 Heat fluxes and their relative errors under different soot volume fractions (Case 3)

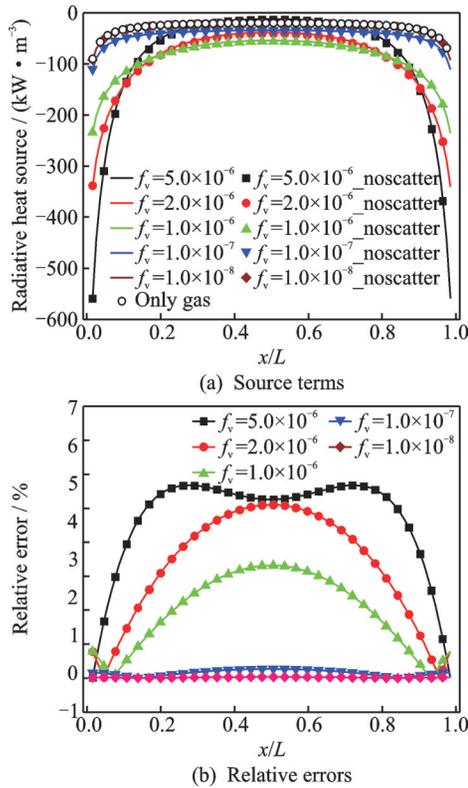


图9 不同体积浓度条件下辐射源项及其误差(工况3)
Fig.9 Source terms and their relative errors under different soot volume fractions (Case 3)

增大,碳黑颗粒的吸收和散射对辐射传输的影响也随之不断增大,并且因为忽略其散射而对辐射传输造成的相对误差也不断增大。因此,在浓度较大时,碳黑颗粒对辐射传输的影响不能忽略。

3.5 不同路径长度对于辐射传输的影响

图10,11分别给出了在 $T=1000\text{ K}$, 体积分数 $f_v=2.0\times 10^{-6}$, 粒径 $D=0.5\ \mu\text{m}$ 条件下, $L=0.1, 0.5, 1.0$ 和 $2.0\ \text{m}$ 时(工况4), 4种路径长度下的辐射热流和辐射源项分布以及因为忽略碳黑颗粒散射所引起的计算误差。如图10,11所示, $L=1.0\ \text{m}$ 时, 由于碳黑颗粒的存在, 即便是体积分数很小, 局部辐射热流和辐射源项均远远大于纯气体介质。粒径和体积分数不变, 随着路径长度的增大, 局部源项不断减小, 但壁面处辐射热流不断增大。造成这种现象的原因可能是: 当路径长度较小时近似为光学薄介质, 发射的能量几乎没有被气体吸收而全部被平板吸收而逃逸出平板; 而当路径长度较大时, 变成光学厚介质, 靠近平板中心处的能量由于强烈的气体吸收作用很难逃逸出平板范围, 这也导致了平板壁面附近位置的梯度增大。随着路径长度由 $0.1\ \text{m}$ 增加到 $2.0\ \text{m}$, 因为忽略碳黑颗粒散射而造成的辐射热流和辐射源项相对误差的最大值分别由 0.49% 和 0.68% 增加到 5.3% 和 5.5% 。因此, 在粒径、浓度一定时, 介质的几何尺寸越大越不能忽略颗粒散射。

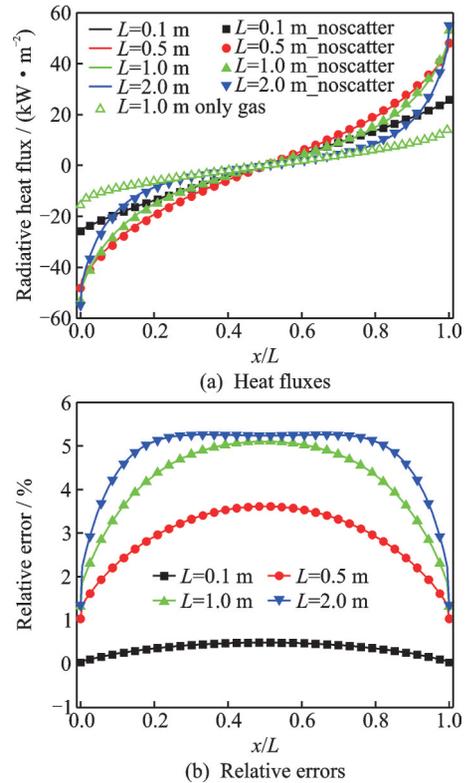


图10 不同路径长度下辐射热流及其误差(工况4)
Fig.10 Heat fluxes and their relative errors at different path lengths (Case 4)

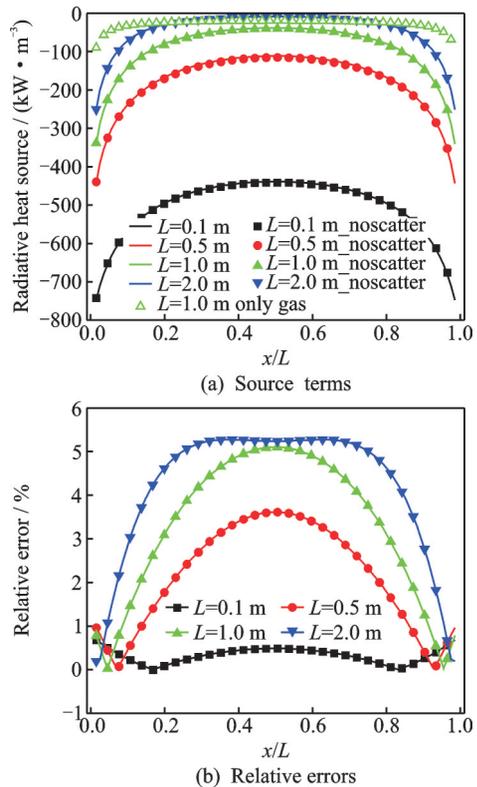


图11 不同路径长度下辐射源项及其误差(工况4)
Fig.11 Source terms and their relative errors at different path lengths (Case 4)

3.6 不同温度对于辐射传输的影响

图12和图13分别给出了 $L=1.0\ \text{m}$, 体积分数

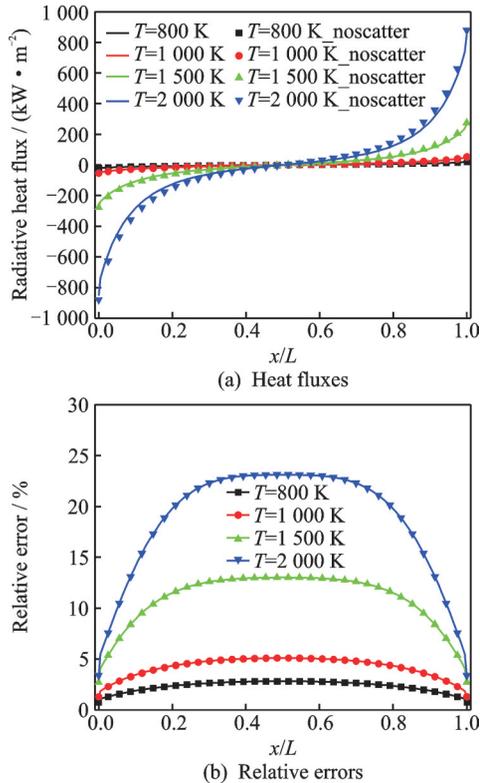


图 12 不同温度下的热流及其误差(工况 5)

Fig.12 Heat fluxes and their relative errors at different temperatures (Case 5)

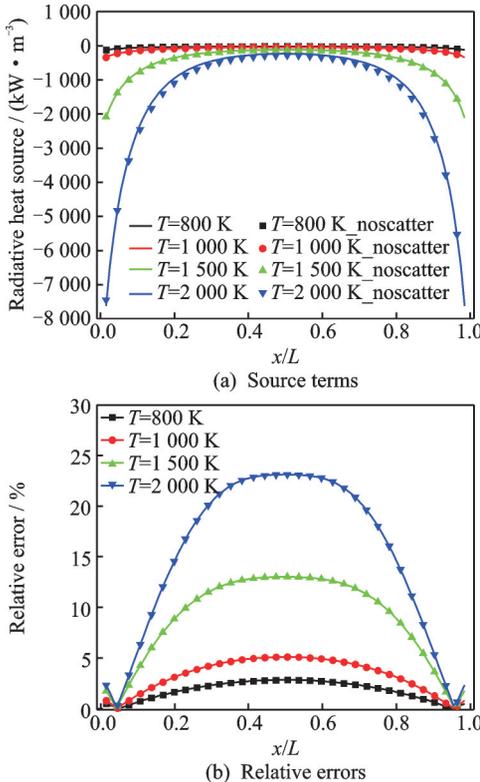


图 13 不同温度下的源项及其误差(工况 5)

Fig.13 Source terms and their relative errors at different temperatures (Case 5)

$f_v=2.0 \times 10^{-6}$, 粒径 $D=0.5 \mu\text{m}$ 条件下, $T=800, 1000, 1500$ 和 2000 K 时(工况 5), 4 种不同介质温

度下的辐射热流和辐射源项分布以及因为忽略碳黑颗粒散射而引起的计算误差。根据辐射力四次方定律 $I_b = \epsilon \sigma T^4$, 随着温度上升, 辐射换热强度明显增强, 局部辐射热流和辐射源项均明显增大, 随着温度由 800 K 升高到 2000 K , 壁面热流由 21.1 kW/m^2 增长到 850.5 kW/m^2 。同时, 因为忽略碳黑颗粒散射而对辐射热流和源项造成的最大相对误差分别由 2.8% 和 2.8% 增大到 23.1% 和 23.4% 。此现象说明, 介质温度对于辐射特性的计算具有非常大的影响, 随着温度不断升高, 因为忽略碳黑颗粒散射而对辐射热流和辐射源项造成的误差随之增大, 因此在高温环境中碳黑颗粒的散射不能忽略。

4 结 论

基于全光谱 k 分布模型结合 MIE 散射理论, 研究了 5 种工况下辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物的辐射特性, 分析了碳黑颗粒散射对辐射热流和辐射源项所带来的影响, 在本文研究参数范围内得到主要结论如下:

(1) 体积分数不变, 随着粒径不断增大, 碳黑颗粒数密度减少, 忽略碳黑颗粒散射将高估混合物的辐射传热特性, 并且所造成的计算误差呈现非单调变化规律, 在粒径 $D=1.0 \mu\text{m}$ 时, 热流和源项的最大误差分别可以达到 26.4% 和 26.3% 。因此, 不能简单依据粒径大小来决定能否忽略碳黑颗粒散射。

(2) 数密度不变, 粒径不断增大, 或者粒径不变, 体积分数不断增大, 因忽略碳黑颗粒散射而对辐射热流和源项造成的误差均随之增大, 最大误差分别可以达到 6.6% , 6.5% (数密度不变, 增大粒径) 和 5.6% , 5.7% (粒径不变, 增大体积分数)。

(3) 粒径、体积分数不变, 随着路径长度增大或者介质温度升高, 因忽略碳黑颗粒散射而造成的误差随之增大, 最大误差分别可以达到 5.3% , 5.5% (路径长度增大) 和 23.1% , 23.4% (温度升高)。

综上所述, 在工程应用中能否忽略碳黑颗粒散射对整个辐射参与性气体-碳黑颗粒混合物辐射传热特性的影响不能简单依据颗粒粒径来判断, 还需要充分考虑介质路径长度、温度及碳黑颗粒浓度等多种因素影响。

参考文献:

[1] MODEST M F, HAWORTH D C. Radiative heat transfer in turbulent combustion systems theory and applications[M]. New York: Springer, 2015: 43-45.

- [2] 吴国江. 电站煤粉锅炉炉膛对流换热的分析[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(1): 119-121.
WU Guojiang. Analysis of convection heat transfer in pulverized-fuel boiler furnace[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(1): 119-121.
- [3] DANNECKER R, NOLL B, SCHILDMACHER K U, et al. Impact of radiation on the wall heat load at a test bench gas turbine combustion chamber: Measurements and CFD simulation [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea & Air. Montreal, Canada: [s.n.], 2007: 1311-1321.
- [4] AKWABOA S, MENSAH P, DIWAN R. Effects of thermal radiation on air plasma spray (APS) coated gas turbine blade [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010. Glasgow, UK: [s.n.], 2010.
- [5] MODEST M F. Radiative heat transfer-3rd edition [M]. New York: Academic Press, 2013: 418-425.
- [6] JOHANSSON R, LECKNER B, ANDERSSON K, et al. Influence of particle and gas radiation in oxy-fuel combustion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 143-152.
- [7] ALEXANDER L B, THOMAS H F. Modeling soot derived from pulverized coal[J]. Energy & Fuels, 1998, 12: 745-757.
- [8] ADAMS B R, SMITH P J. Modeling effects of soot and turbulence-radiation coupling on radiative transfer in turbulent gaseous combustion[J]. Combustion Science and Technology, 1995, 109 (1/2/3/4/5/6): 121-140.
- [9] 许开龙, 吴玉新, 申浩树, 等. 煤粉火焰中碳烟生成及其辐射换热——模型开发与FLUENT实现[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5961-5969.
XU Kailong, WU Yuxin, SHEN Haoshu, et al. Soot formation and its radiative heat transfer in coal flames: Model development and implementation with fluent [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5961-5969.
- [10] OMIDVARBORNA H, KUMAR A, KIM D S. Recent studies on soot modeling for diesel combustion [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 48: 635-647.
- [11] ARNOLD J O, WHITING E E, LYLE G C. Line by line calculation of spectra from diatomic molecules and atoms assuming a voigt line profile[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1969, 9(6): 775-798.
- [12] SCHENKER G N, KELLER B. Line-by-line calculations of the absorption of infrared radiation by water vapor in a boxshaped enclosure filled with humid air[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(17): 3127-3134.
- [13] MODEST M F. The treatment of nongray properties in radiative heat transfer—from past to present[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135: 061801-1-061801-12.
- [14] DORIGON L J, DUCIAK G, ROGÉRIO B, et al. WSGG correlations based on HITEMP2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H₂O/CO₂ mixtures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 863-873.
- [15] SOLOVJOV V P, WEBB B W. SLW modeling of radiative transfer in multicomponent gas mixtures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2000, 65: 665-672.
- [16] MODEST M F, ZHANG Hongmei. The full-spectrum correlated-k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124: 30-38.
- [17] ZHANG Hongmei, MODEST M F. Scalable multi-group full-spectrum correlated-*k* distributions for radiative transfer calculations[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125: 454-461.
- [18] MISHCHENKO M I, TRAVIS L D, LACIS A A. Scattering, absorption, and emission of light by small particles [M]. [S.l.]: Cambridge University Press, 2002.
- [19] XU Yulin, KHLEBTSOV N G. Orientation-averaged radiative properties of an arbitrary configuration of scatterers [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 79: 1121-1137.
- [20] WANG Chaojun, MODEST M F, HE Boshu. Full-spectrum *k*-distribution look-up table for nonhomogeneous gas-soot mixtures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2016, 176: 129-136.
- [21] TRIVIC D N. 3-D radiation modeling of nongray gases-particles mixture by two different numerical methods [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 298-312.
- [22] MARAKIS J M, PAPAPAVLOU C, KAKARAS E. A parametric study of radiative heat transfer in pulverised coal furnaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43: 2961-2971.
- [23] CHANG H, CHARALAMPOPOULOS T T. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1990, 430(1880): 577-591.
- [24] HOFGREN H, SUNDÉN B. Evaluation of Planck mean coefficients for particle radiative properties in

- combustion environments[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2014, 51(4): 507-519.
- [25] BAHADOR M, SUNDÉN B. Investigation on the effects of fly ash particles on the thermal radiation in biomass fired boilers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(9/10): 2411-2417.
- [26] 谈和平,夏新林,刘林华,等. 红外辐射传输与传输数值计算——计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 107-115.
- TAN Heping, XIA Xinlin, LIU Linhua, et al. Numerical calculations of infrared radiative characteristics and transmission—Calculation of thermal radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 107-115.
- [27] WANG Chaojun, GE Wenjun, MODEST M F. A full-spectrum k -distribution look-up table for radiative transfer in nonhomogeneous gaseous media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 168: 46-56.
- [28] CHU Huaqiang, LIU Fengshan, CONSALVI J L. Relationship between the spectral line based weighted-sum-of-gray-gases model and the full spectrum k -distribution model[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 143: 111-120.
- [29] GUO Junjun, LI Xiangyu, HUANG Xiaohong, et al. A full spectrum k -distribution based weighted-sum-of-gray-gases model for oxy-fuel combustion[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 218-226.
- [30] CHU Huaqiang, LIU Fengshan, ZHOU Huaichun. Calculations of gas thermal radiation transfer in one-dimensional planar enclosure using LBL and SNB models[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(21): 4736-4745.
- [31] LIU Fengshan. Application of the statistical narrow-band correlated- k method to low-resolution spectral intensity and radiative heat transfer calculations-effects of the quadrature scheme[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: 3119-3135.

(编辑:刘彦东)