

研究论文

气体与粒子混合物辐射特性宽带 k 分布模型

尹雪梅, 刘林华, 李炳熙

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 建立了一种新的宽带 k 分布模型, 用多项式拟合了水蒸气和二氧化碳气体 10 个重要谱带的 k 分布吸收系数。粒子的吸收和散射在各宽谱带上近似为灰体。用该模型计算了气体混合物以及气体与粒子混合物的辐射热通量, 并与逐线计算进行比较。结果表明, 宽带 k 分布模型和逐线计算结果吻合很好。本文提出的宽带 k 分布模型及拟合关系式大大提高了气体辐射特性的计算精度和计算速度, 且对混合物的处理简单易行。

关键词: 二氧化碳; 水蒸气; 粒子; 宽带 k 分布模型

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 06-1354-06

Wide band k distribution model for radiative properties of gas and particle mixtures

YIN Xuemei, LIU Linhua, LI Bingxi

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: A new wide band k -distribution model was developed, in which the k -distribution absorption coefficients of carbon dioxide and vapor in ten main bands were expressed in polynomial functions. The absorption coefficient and scattering coefficient of particle were assumed gray in each band. The heat flux for gas and particle mixtures was computed by using the wide band k -distribution model and compared with that obtained by using line-by-line calculations. Comparison result showed that the relative errors of the wide band k -distribution model were very small. The new wide band k -distribution model and the polynomial functions could be used to calculate radiative properties of gases with higher accuracy while the time for calculation was reduced significantly. Furthermore, the wide bank k -distribution model could also be used for gas and particle mixtures.

Key words: carbon dioxide; vapor; particle; wide band k distribution model

引 言

辐射换热在各种燃烧场合具有重要作用, 如锅炉炉膛^[1-3]、燃气轮机燃烧室。燃烧室中不仅有燃烧气体混合物 (主要是二氧化碳和水蒸气), 还含有煤灰、炭黑粒子, 这些粒子的吸收和散射显著增

强了炉内的辐射换热。为了准确计算辐射必须考虑混合物的非灰辐射特性。考虑气体的非灰辐射特性已使整个辐射计算量非常大, 加上粒子使辐射问题变得更复杂。

计算气体辐射特性最精确的方法是逐线计算 (LBL)^[4], 由于其巨大的计算量, 一般只将逐线计

2007-10-24 收到初稿, 2008-03-11 收到修改稿。

联系人: 刘林华。第一作者: 尹雪梅 (1979—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50425619, 50636010)。

Received date: 2007-10-24.

Corresponding author: Prof. LIU Linhua. E-mail: lhliu@hit.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50425619, 50636010).

算结果作为检验其他模型准确度和有效性的基准解。最简单的方法是总体模型，如灰气体加权和模型 (WSGG)^[5]、基于光谱线的灰气体加权和模型 (SLW)^[6-8]，但它们的精度都很差。近年来 Modest 等^[9-13]提出的全光谱 k 分布模型 (FSK) 在一定范围内提高了总体模型的计算精度，但由于谱带范围太大，温度对不同波数区间的吸收系数影响不同，导致对非等温介质误差很大，特别是混合气体。综合考虑计算的精度和速度以及与辐射传递方程求解方法的相容性，宽谱带 k 分布模型是一种较好的选择。现有的宽谱带 k 分布模型^[14-17] 基本都建立在指数宽谱带模型基础上，其精度和适用性有限。本文建立了一种新的宽带 k 分布模型，用多项式拟合了水蒸气和二氧化碳气体在 10 个重要谱带上的 k 分布吸收系数，能快速准确计算气体和粒子混合物的辐射换热。

1 宽带 k 分布模型

气体和粒子的光谱辐射特性差别很大。对粒子而言，由于其吸收和散射都是连续平滑变化的，在每个宽谱带上可近似看成灰体。气体吸收在整个光谱上间断分布且剧烈变化，线强的大小直接影响到对应光谱区间吸收系数的数值，大小不同的吸收系数在相同的几何行程长度下的光学厚度不同，若将线强相差很大的波数区间分在一起则会产生很大的误差。综合考虑 H_2O 和 CO_2 的线强分布规律，本文将整个光谱分成以下 10 个不重叠的波数区间：150~450、450~800、800~1200、1200~2100、2100~2400、2400~3300、3300~3800、3800~4700、4700~6000、6000~8000 cm^{-1} 。

k 分布思想就是：在小的谱带间隔内普朗克函数基本不变，辐射强度和热通量只受气体吸收系数影响，相同的吸收系数值得到相同的辐射强度和热通量。在一定的谱带区间内，将剧烈变化的吸收系数排列成平滑单调上升的函数，对相同的吸收系数只求一次辐射传递方程。

通过考察重要谱带上不同温度下最大普朗克函数 $I_{b\gamma_{max}}$ 和最小普朗克函数 $I_{b\gamma_{min}}$ 差值与谱带中心波数 γ_0 的普朗克函数 $I_{b\gamma_0}$ 的比值 $diff = (I_{b\gamma_{max}} - I_{b\gamma_{min}}) \times 100\% / I_{b\gamma_0}$ ，可以看出二氧化碳和水蒸气的 $diff$ 最大值分别可能达到 220% 和 2050% 以上。由于宽谱带的波数间距较大，普朗克函数变化大，为了克服假设普朗克函数不变导致的误差，在 k 分布模型中

引入普朗克函数加权，则吸收系数概率分布函数 $f(T, k)$ 为

$$f(T, k) = \frac{1}{I_{b\Delta\gamma}} \int_{\Delta\gamma} I_{b\gamma}(T) \delta(k - \kappa_\gamma) d\gamma \quad (1)$$

式中 $I_{b\Delta\gamma}$ 和 $I_{b\gamma}$ 分别表示温度 T 时谱带区间内总的黑体强度和光谱黑体强度， κ_γ 是光谱吸收系数， $\delta(k - \kappa_\gamma)$ 是 Dirac-delta 函数。累积分布函数 $g(T, k)$ 定义为

$$g(T, k) = \int_0^k f(T, k) dk \quad (2)$$

k 为与累积 k 分布函数对应的混合气体的吸收系数。

光谱辐射传递方程及其漫射边界条件为

$$\frac{dI_\gamma}{ds} = (\kappa_\gamma + \kappa_p) I_{b\gamma} - (\kappa_\gamma + \kappa_p + \sigma_s) I_\gamma + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_\gamma(s') \Phi(s, s') d\Omega' \quad (3)$$

$$I_{w\gamma} = \epsilon_w I_{bw\gamma} + (1 - \epsilon_w) \frac{1}{\pi} \int_{n_w \cdot s > 0} I_\gamma |n_w \cdot s| d\Omega \quad (4)$$

式中 I_γ 是 s 方向的入射光谱辐射强度， κ_γ 是混合气体光谱吸收系数， κ_p 是粒子宽带的平均吸收系数， σ_s 是粒子宽带的平均散射系数， $\Phi(s, s')$ 是光谱散射相函数， ϵ_w 是壁面发射率， $I_{bw\gamma}$ 是壁面光谱黑体强度， n_w 是壁面单位外法向矢量。式 (3) 和式 (4) 的两边乘 $\delta(k - \kappa_\gamma)$ 后在谱带区间上积分，再除吸收系数概率分布函数 $f(T, k)$ ，得

$$\frac{dI_g}{ds} = (k + \kappa_p) (I_{b\Delta\gamma} - I_g) - \sigma_s \left[I_g - \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I_g(s') \Phi(s, s') d\Omega' \right] \quad (5)$$

$$I_{wg} = \epsilon_w I_{bwg} + (1 - \epsilon_w) \frac{1}{\pi} \int_{n_w \cdot s < 0} I_g |n_w \cdot s| d\Omega \quad (6)$$

其中

$$I_g = \int_{\Delta\gamma} I_\gamma \delta(k - \kappa_\gamma) d\gamma / f(T, k) \quad (7)$$

谱带区间内总辐射强度可由式 (8) 得到

$$I = \int_{\Delta\gamma} I_\gamma d\gamma = \int_0^1 I_g dg \quad (8)$$

常用 Gauss 型的积分方法来计算式 (8)，考虑到波数间隔较大，本文采用 12 点 Gauss-Lobatto 积分

$$I = \sum_{j=1}^N \omega_j I_{g_j} \quad (9)$$

式中 N 是积分点数， ω_j 是求积的权。

假设混合物重叠谱带各种气体的吸收系数是统计非关联的，应用穿透率乘法原理，采用 Gauss 型的积分方法，式 (5) 变为

$$\frac{dI_{g_i}}{ds} = (k_{ci} + k_{hi} + \kappa_p) (I_{b\Delta\gamma} - I_{g_i}) -$$

$$\sigma_s \left[I_{g_i} - \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I_{g_i}(s') \Phi(s, s') d\Omega' \right] \quad (10)$$

式中 k_{ci} 和 k_{hi} 分别是 Gauss 积分点对应的二氧化碳和水蒸气的吸收系数。

2 混合物的处理

气体吸收系数在整个光谱上剧烈变化，而粒子的吸收系数和散射系数变化相对平滑，根据气体和粒子的光谱辐射特性特点，对气体和粒子分别采用不同的处理方法。本文着重考虑尺度参数 $x \ll 1$ 的小粒子和 $x \gg 1$ 的大粒子。

2.1 气体

在总压 $p = 101.325 \text{ kPa}$ 条件下，从高温气体数据库 HITEMP^[18] 获取光谱特性参数，由式 (1) 和式 (2) 计算得到浓度在 0.01~1 之间、温度在 300~3000 K 范围内，以上 10 个谱带不同温度和浓度下 Gauss 积分点对应的二氧化碳和水蒸气的吸收系数。并采用 6 次多项式拟合了二者的吸收系数，其函数形式为

$$k(g_i) = x(a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + hT^6) \quad (11)$$

式中 T 是气体温度； x 是吸收气体浓度； a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 h 为多项式拟合系数，不同的谱带拟合系数数值不同。二氧化碳谱线的自加宽半宽和空气加宽半宽相当，不同摩尔分数的拟合公式基本相同。而水蒸气谱线的自加宽半宽约是空气加宽半宽的 5 倍，不同摩尔分数的拟合公式不同。本文分别对摩尔分数为 0.01、0.1、1 的水蒸气进行了拟合。水蒸气浓度小于 0.01 的吸收系数用摩尔分数为 0.01 的拟合系数和式 (11) 直接得到，浓度处于 0.01~1 之间的吸收系数通过线性插值得到。

2.2 小粒子

粒子的吸收和散射在每个宽谱带上可近似为灰体。吸收系数和散射系数取每个谱带的平均值。若粒子的尺度参数 $x \ll 1$ ，散射可忽略，只考虑吸收。为考察粒子的吸收对辐射的影响，本文在进行辐射计算时选用炭黑粒子。若炭黑的复折率 $m = n - ik_p$ ，其折射指数和吸收指数 n 、 k_p 采用 Chang 等^[19] 提出的关系式拟合

$$n = 1.811 + 0.1263 \ln \lambda + 0.0270 \ln^2 \lambda + 0.0417 \ln^3 \lambda \quad (12)$$

$$k_p = 0.5821 + 0.1213 \ln \lambda + 0.2309 \ln^2 \lambda - 0.0100 \ln^3 \lambda \quad (13)$$

式 (12) 和式 (13) 在波长范围为 $0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 30$

μm 内有效。利用 Rayleigh 散射理论^[5]，炭黑的吸收系数 $\kappa_{p,\lambda}$ 为

$$\kappa_{p,\lambda} = \frac{36\pi n k_p}{(n^2 - k_p^2 + 2)^2 + 4n^2 k_p^2} \frac{f_v}{\lambda} \quad (14)$$

式中 f_v 为炭黑的体积分。

2.3 大粒子

当粒子的尺度参数 $x \gg 1$ 时，必须考虑粒子的散射。为了分别考察粒子的吸收和散射对辐射的影响，本文中粒子的散射因子 Q_{scat} 采用 Hulst 提出的近似关系式得到^[13]

$$Q_{\text{scat}} = 2 - \frac{4}{l} \left(\sin l - \frac{1 - \cos l}{l} \right) \quad (15)$$

式中 $l = 2x(n - 1)$ ， $x = 2\pi a/\lambda$ 是粒子的尺度参数， a 为粒子半径。该关系式适用于吸收指数 $k_p \approx 0$ 且折射指数 n 接近于 1 的粒子以及 $x \gg 1$ 的粒子。下面的算例中假设粒子为各向同性散射，为了移除由衍射引起的前向散射峰值的影响，将散射因子 Q_{scat} 减去 $(1 - e^{-0.1x})$ ^[13]，则粒子的散射系数可近似为

$$\sigma_s = Q_{\text{scat}} \pi a^2 N_t \quad (16)$$

式中 N_t 为粒子数密度。

3 模型检验与分析

为了验证宽带 k 分布模型及其对气体和粒子混合物辐射问题处理的有效性，下面计算两无限大平板间 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和粒子混合物的局部辐射热通量。下面的算例中，宽带 k 分布模型 (WBCK) 是将粒子看成一种气体，从 HITEMP 获取气体光谱特性数据，先计算 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和粒子混合物的吸收系数，再根据式 (1) 和式 (2) 直接得到重叠谱带 Gauss 积分点对应的吸收系数后，由式 (5) 求解辐射传递方程得到的计算结果。WBCK-f 是先采用拟合关系式 (11) 分别得到 H_2O 和 CO_2 谱带 Gauss 积分点对应的吸收系数，再对谱带端点波数应用式 (14) 和式 (16)，平均后得到粒子的吸收系数 κ_p 和散射系数 σ_s ，最后求解辐射传递方程式 (10) 得到结果。

3.1 等温混合物

平板为黑体且温度均为 0 K。混合物总压力 $p = 101.325 \text{ kPa}$ ， CO_2 分压力 $p_{\text{CO}_2} = 0.05p$ ， H_2O 分压力 $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0.05p$ ，温度 $T = 1200 \text{ K}$ ，平板间距 $L = 25 \text{ cm}$ 。沿气体层厚度方向分 100 个单元，角度分 20 个单元立体角。逐线计算取波数间距 $\delta_\eta = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ ，以逐线计算作为基准，各模型的总体误差 err 定义为

$$\text{err} = \int_0^L |q_{\text{model}} - q_{\text{LBL}}| dx \times 100\% / \int_0^L |q_{\text{LBL}}| dx \quad (17)$$

其中, q 为壁面辐射热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

算例 1 只有 H_2O 和 CO_2 混合, 其局部辐射热通量如图 1 所示, 其中 σ 为辐射常数。

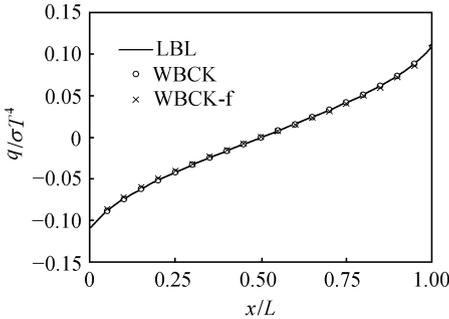


图 1 混合气体局部辐射热通量 (算例 1)

Fig.1 Local radiative heat flux for gas mixture (example 1)

算例 2 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和炭黑混合物, 粒子尺度参数 $x \ll 1$, 只考虑粒子吸收, 其炭黑体积分数 $f_v = 10^{-6}$, 图 2 是局部辐射热通量图。和图 1 比较可以看出即使粒子体积分数很小, 其发射和吸收也使辐射换热大大增强。

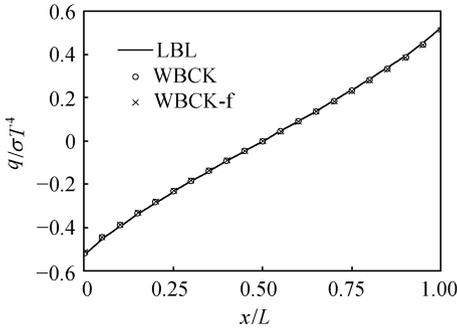


图 2 混合物局部辐射热通量 (算例 2)

Fig.2 Local radiative heat flux for mixture (example 2)

算例 3 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和大粒子混合物, 粒子吸收指数 $k_p = 0$, 折射指数 $n = 1.3$, 粒子半径 $a = 10 \mu\text{m}$, 粒子数密度 $N_t = 2.387 \times 10^8$ 。图 3 示出了其局部辐射热通量。比较图 1 和图 3 可以看出由于粒子数密度较小, 散射的影响不明显。

算例 4 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和大粒子混合物, 粒子属性同算例 3, 粒子数密度增大为 $N_t = 2.387 \times 10^{11}$, 局部辐射热通量如图 4 所示。比较图 1、图 3 和图 4 可以得出以下结论: 随着粒子数密度增大, 粒子的散射大大增强, 虽然粒子体积分数远远小于气体, 但其对辐射换热的影响远远大于气体。

由图 1~图 4 可看出 WBCK 和 WBCK-f 都与

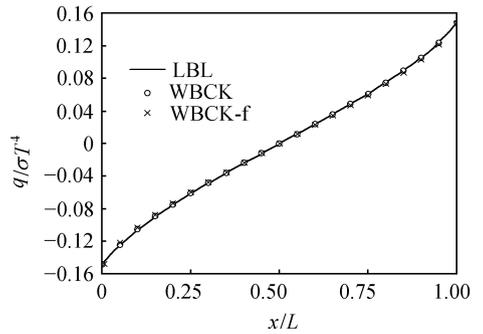


图 3 混合物局部辐射热通量 (算例 3)

Fig.3 Local radiative heat flux for mixture (example 3)

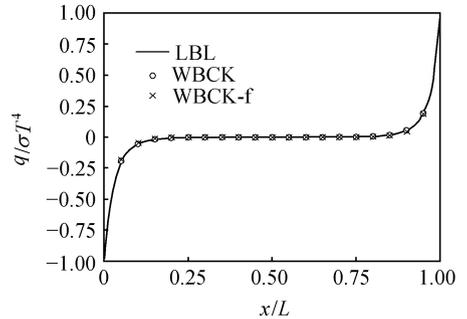


图 4 混合物局部辐射热通量 (算例 4)

Fig.4 Local radiative heat flux for mixture (example 4)

逐线计算结果吻合很好。为了对它们的精度有个量的认识, 表 1 给出两模型与逐线计算比较的总体误差。可以看出: WBCK 误差很小, 最大误差值小于 4%; WBCK-f 与逐线计算结果吻合也很好, 基本小于 3%, 粒子散射影响很大时误差也仅 7%。WBCK-f 的计算时间很短, 不到 2 s, 而 LBL 需近 30 h。所得结果均用 AMD2200+ 计算机获得。

表 1 混合物局部热通量各模型的整体误差/%

Table 1 Overall error of models for mixture local radiative flux compared with LBL/%

Model	Overall error			
	Example 1	Example 2	Example 3	Example 4
WBCK	0.17	1.74	0.67	3.25
WBCK-f	2.71	2.29	2.49	7.07

3.2 非等温混合物

由于气体“热线”的存在, 导致关联 k 假设对大的光谱区间在温度剧烈变化时会失效, 从而使辐射计算产生很大的误差。下面对两无限大冷黑平板间非等温 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 和粒子混合物进行计算来考察本文建立的宽带 k 分布模型对大的温度浓度变化的气体的适用性。如图 5 所示, 混合物总压力 $p = 101.325 \text{ kPa}$, 由两不同温度的等温层组成。左侧

气体分压 $p_{H_2,OL} = 0.02p$, $p_{CO_2,L} = 0.2p$ 。右侧气体分压 $p_{H_2,OR} = 0.2p$, $p_{CO_2,R} = 0.02p$ 。左侧温度 $T_L = 1500\text{ K}$, 右侧气体温度 $T_R = 500\text{ K}$ 。左层厚度 $L_L = 50\text{ cm}$, 右层厚度 L_R 变化。计算右壁面的辐射热通量。模型的相对误差为 $|q_{\text{model}} - q_{\text{LBL}}| \times 100\% / q_{\text{LBL}}$ 。

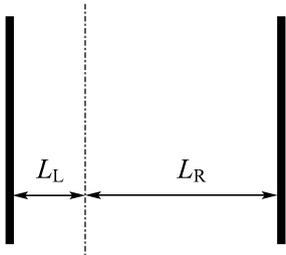


图 5 无限大平板的示意图

Fig. 5 Sketch map of parallel plate

算例 5 只有 H_2O 和 CO_2 混合, 右壁面辐射热通量如图 6 所示, 并与 Modest 等^[11]采用全光谱关联 k 分布模型 (FSCK) 和全光谱标定 k 分布模型 (FSSK) 的计算结果进行比较, 其中 q_w 为壁面辐射热通量, $W \cdot m^{-2}$ 。可以看出 WBCK 和 WBCK-f 误差很小, 误差最大值分别为 6.7% 和 1.0%, 而 FSCK 和 FSSK 误差都很大, 误差最大值分别达到了 73.6% 和 66.3%。由此说明由于温度剧烈变化, 关联 k 假设对整个光谱而言完全失效, 导致全光谱 k 分布模型产生很大的误差, 而将整个光谱分成 10 个光谱区间, 在较大的光谱区间内关联 k 相对有效, 大大提高了计算精度。

算例 6 H_2O-CO_2 和炭黑混合物, 左层炭黑体积分数 $f_{vL} = 10^{-3}$, 右层煤灰体积分分数 $f_{vR} = 10^{-6}$ 。从右壁面辐射热通量图 (图 7) 可以看出 WBCK 和 WBCK-f 误差最大值分别为 1.9% 和 2.0%。

算例 7 H_2O-CO_2 和大粒子混合物, 粒子属性与前面算例相同, 左层粒子数密度 $N_{tL} = 1.25 \times 10^8$, 右层粒子数密度 $N_{tR} = 1.25 \times 10^{11}$ 。图 8 是右壁面辐射热通量, WBCK 和 WBCK-f 误差最大值分别为 6.8% 和 7.9%。

算例 8 H_2O-CO_2 与炭黑和大粒子同时存在, 左层炭黑体积分分数 $f_{vL} = 10^{-3}$, 右层煤灰体积分分数 $f_{vR} = 10^{-6}$, 左层粒子数密度 $N_{tL} = 1.25 \times 10^8$, 右层粒子数密度 $N_{tR} = 1.25 \times 10^{11}$ 。右壁面辐射热通量如图 9 所示。WBCK 和 WBCK-f 误差最大值分别为 8.1% 和 13.6%。算例 7 和算例 8 中宽带 k 分布模型误差较大的原因在于: 粒子的吸收和散射对辐射起决定作用, 而本文采用的是将其在宽谱带上

近似为灰体的处理方式。

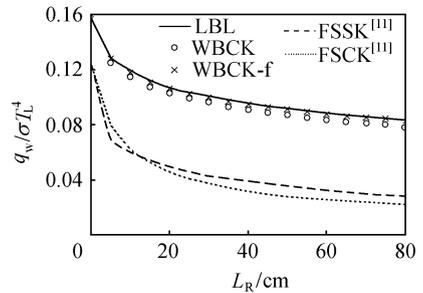


图 6 混合气体右壁面热通量

Fig. 6 Heat flux exiting from right plate for gas mixture

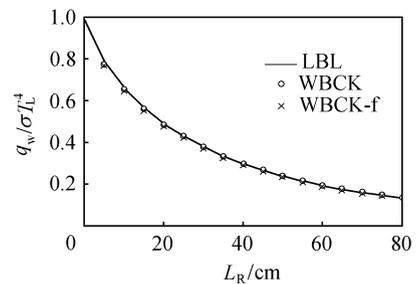


图 7 混合物右壁面热通量 (算例 6)

Fig. 7 Heat flux exiting from right plate for mixture (example 6)

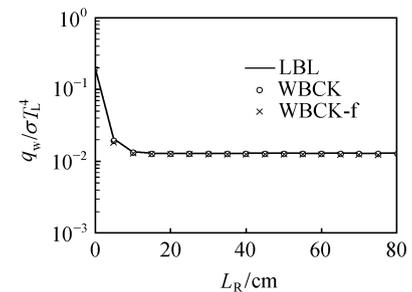


图 8 混合物右壁面热通量 (算例 7)

Fig. 8 Heat flux exiting from right plate for mixture (example 7)

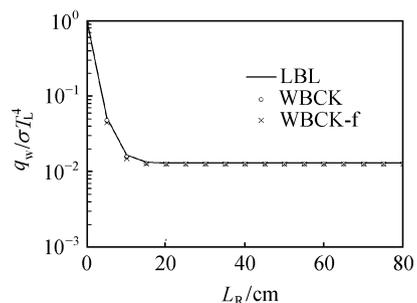


图 9 混合物右壁面热通量 (算例 8)

Fig. 9 Heat flux exiting from right plate for mixture (example 8)

4 结 论

本文建立了一种新的宽带 k 分布模型, 采用多项式拟合了 10 个重要谱带上 H_2O 和 CO_2 的模型参数。粒子的吸收和散射都是连续平滑变化的, 在宽谱带上近似为灰体, 取谱带端点波数计算吸收系数和散射系数的平均值。

用该模型计算两无限大平板间充有 H_2O-CO_2 和粒子混合物时的辐射热通量。结果显示: 粒子体积分数很小, 其发射和吸收也大大增强了辐射换热。粒子的散射作用是随着粒子数密度的增大而增强的, 虽然粒子体积分数远远小于气体, 但其散射对辐射换热的影响远远大于气体。和逐线计算比较表明: 利用高温气体数据库直接得到宽带 k 分布函数和采用拟合关系式得到宽带 k 分布函数所得结果与逐线计算吻合都很好。和全光谱 k 分布模型比较说明: 在温度剧烈变化的情况下, 宽带 k 分布模型在较大的光谱区间内关联 k 假设有效, 大大提高了计算精度。从计算时间看, 宽带 k 分布模型使气体辐射特性的计算速度得到很大的提高。本文的拟合关联式对混合气体的处理简单准确, 很适于辐射换热问题求解。

References

- [1] Shen Jiubin (沈九宾), Chen Haigeng (陈海耿), Chen Wan (陈婉). Calculation of total radiative exchange areas using discrete transfer method. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2003, **54** (12): 1674-1677
- [2] Jiang Xiumin (姜秀民), Liu Hui (刘辉), Yan Che (闫澈), et al. NO_x and SO_2 emission and combustion characteristics of super fine pulverized coal particle. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2004, **55** (5): 783-787
- [3] Li Zheng (李政), Peng Zefei (彭泽飞), Han Zhiming (韩志明), et al. Dynamic mathematical model of pressurized fluidized bed combustor. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2002, **53** (4): 349-354
- [4] Schenker G N, Keller B. Line-by-line calculation of the absorption of Infrared radiation by water vapor in a box-shaped enclosure filled with humid air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, **38** (17): 3127-3134
- [5] Modest M F. Radiative Heat Transfer. New York: McGraw-Hill Press, 2002: 611-637
- [6] Denison M K, Webb B W. An absorption-line blackbody distribution function for efficient calculation of total gas radiative transfer. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1993, **50** (5): 499-510
- [7] Solovjov V P, Webb B W. SLW modeling of radiative transfer in multi-component gas mixtures. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2000, **65** (6): 655-672
- [8] Solovjov V P, Webb B W. An efficient method for modeling radiative transfer in multi-component gas mixtures with soot. *ASME J. Heat Transfer*, 2001, **123** (3): 450-457
- [9] Modest M F, Zhang H. The full-spectrum correlated- k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures. *ASME J. Heat Transfer*, 2002, **124** (1): 30-38
- [10] Wang L, Modest M F. Narrow-band based multiscale full-spectrum k -distribution method for radiative transfer in inhomogeneous gas mixtures. *ASME J. Heat Transfer*, 2005, **127** (7): 740-748
- [11] Modest M F. Narrow-band and full-spectrum k -distributions for radiative heat transfer correlated- k vs scaling approximation. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2003, **76** (1): 69-83
- [12] Zhang H. Radiative properties and radiative heat transfer calculations for high temperature combustion gases [D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2002: 43-135
- [13] Modest M F, Riazzi R J. Assembly of full-spectrum k -distributions from a narrow-band database; effects of mixing gases, gases and nongray absorbing particles, and mixtures with nongray scatterers in nongray enclosures. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **90** (2): 169-189
- [14] Marin O, Buckius R O. A simplified wide band model of the cumulative distribution function for carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41** (23): 3881-3897
- [15] Marin O, Buckius R O. A simplified wide band model of the cumulative distribution function for water vapor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41** (19): 2877-2892
- [16] Nie Yuhong (聂宇宏), Chen Haigeng (陈海耿). Modification of wide band correlated- k method for radiative calculation. *Journal of Computation Physics* (计算物理), 2002, **19** (5): 439-442
- [17] Nie Yuhong (聂宇宏), Chen Haigeng (陈海耿). Wide band absorption coefficient models of nongray gases. *Journal of Northeastern University: Natural Science* (东北大学学报: 自然科学版), 2002, **23** (4): 375-378
- [18] Rothman L S, Camy P C, Flaud J M, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database 2000 [EB/OL]. <http://www.hitran.com>
- [19] Chang H, Charalampopoulos T T. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot// Proc. of the Royal Society of London, Series A, 1990, **430** (1880): 577-591