

高压高浓度 CO₂ 烟气辐射换热特性分析与计算

李皓宇, 阎维平, 孙俊威, 董静兰

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 071003, 河北保定)

摘要: 针对高压 O₂/CO₂ 燃烧方式下高浓度 CO₂ 和水蒸气混合气体烟气的辐射换热问题, 建立了一种新的宽带关联 k 分布模型. 为了验证模型的有效性, 以 O₂/CO₂ 燃烧方式下炉内 CO₂ 和水蒸气生成状况为例, 采用该模型与离散坐标法相结合的方法计算了不同温度(1 000~2 500 K)和压力(0.1~1.5 MPa)下一维无限大平行平板间混合气体的辐射强度和 CO₂ 4.3 μm 谱带累积分布函数, 并与逐线计算、全光谱关联 k 分布模型和基于指数的宽带关联 k 模型的计算结果进行了比较. 结果表明: 随着压力的增加, 所提出的宽带关联 k 分布模型与逐线计算的结果吻合较好, 与文献报导的两个模型相比, 不仅计算精度有所提高, 而且对混合气体的处理更加简便灵活, 因此更适于高压下烟气辐射特性的计算.

关键词: 高压高浓度 CO₂ 烟气; 辐射换热; 宽带关联 k 模型; 离散坐标法

中图分类号: TK224.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0017-07

Analysis and Calculation on Radiative Heat Transfer of Flue Gas at High Pressure and Carbon Dioxide Concentration

LI Haoyu, YAN Weiping, SUN Junwei, DONG Jinglan

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: A new wide band correlated- k distribution model was proposed to calculate the radiative heat transfer of the water vapor and carbon dioxide gas mixture at high pressure and concentration under pressurized O₂/CO₂ combustion mode. The radiation intensity and carbon dioxide 4.3 μm band cumulative distribution function between two cold and black parallel plates were calculated to verify the present model by combination of the present model and the discrete ordinate method at 1 000-2 500 K and 0.1-1.5 MPa in the furnace of a coal-fired boiler. The comparison shows that the results from the present model are more reasonably consistent with those by the line-by-line method with an increase in pressure. Moreover, the accuracy of the present model is higher than that of the full-spectrum correlated- k distribution model or the wide band correlated- k distribution model based on the exponent in literature. It seems that this new wide band correlated- k model is suitable to the radiative heat transfer of flue gas at high pressure.

Keywords: high pressure and carbon dioxide concentration flue gas; radiative heat transfer; wide band correlated- k distribution model; discrete ordinate method

燃煤电站是 CO₂ 的集中排放源, 从烟气中分离与捕集 CO₂ 是实施 CO₂ 捕获与封存技术的关键. 富氧燃烧技术是现有最有希望的燃煤近零排放技术之

一^[1], 但该技术的空气分离制氧与压缩高浓度 CO₂ 烟气的过程均在高压下进行, 富氧燃烧却在常压下进行, 系统压力经历升-降-升, 能量损失严重. 为避

收稿日期: 2010-09-12. 作者简介: 李皓宇(1985-), 男, 博士生; 阎维平(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA05Z310); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10QX38).

网络出版时间: 2011-02-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110221.1610.010.html>

免上述损失,提出采用增压富氧燃煤发电技术^[2],该新型整体化发电系统从空分制氧、锅炉燃烧与换热,直到烟气压缩捕集 CO₂ 的全过程均维持在高压下完成,这样一方面避免了压力大幅度变化的损失,另一方面也大大提高了烟气中水蒸气的凝结温度,使得从锅炉排烟中回收水蒸气的汽化潜热成为可能,使锅炉效率约提高 3%~5%,可以部分弥补制氧与压缩 CO₂ 所损失的发电效率。

锅炉炉膛内的主要传热方式为辐射热传递,气体辐射热流计算结果的准确性对炉膛的设计和燃烧过程的分析有很大影响。在增压富氧燃烧方式下,烟气中 CO₂ 的体积分数可达 90%以上,并且由于烟气的再循环使得水蒸气的含量也较空气燃烧方式大大提高。高体积分数的 CO₂ 和水蒸气产生了更强的三原子气体辐射,当温度和压力升高时,离解、电子跃迁和电离变得具有更大的可能性,在工程辐射计算中,振动-转动谱带是最重要的吸收和发射光谱范围,每个谱带包含成千上万的谱线,这些光谱线导致在整个谱上吸收系数剧烈变化,使得传统炉内计算使用的双灰体假设模型变得不再适用。

在现有描述气体非灰辐射特性的模型中,逐线计算是最准确的,但需要知道气体分子每条谱线的详细光谱特性参数。以 HITEMP(2000)数据库^[3]为例,CO₂ 有 1 032 269 条谱线,H₂O 有 1 283 468 条谱线,计算量巨大,在工程实际中无法应用,一般只将逐线计算作为检验其他模型的准确度和有效性的基准解。灰体加权和模型^[4]是较简便的计算气体谱吸收系数 k 的方法,但它的原理本身不符合气体辐射机理。窄谱带关联 k 模型(NBCK)^[5]需要计算不同温度下的吸收系数然后重排,计算过程中消耗大量的计算机内存和时间。现有的宽谱带关联 k 模型(WBCK)^[6]基本都建立在指数宽带模型基础上,再加上一些假设,就使得模型的精度和适用性受到了限制,特别是对混合气体。本课题组曾在文献^[7]中建立了一种改进的宽带关联 k 模型,但该模型没有考虑积分谱带变宽对普朗克函数的影响,所以计算精度较低。

为此,本文针对增压富氧燃烧方式下混合气体的辐射换热问题,在考虑温度和压力对谱带影响的基础上,建立了一种新的分段计算模型,该模型考虑了相邻谱带对各谱带波数上下限之差的影响。计算结果表明,该模型在高温高压下具有较高的精确性,适用于增压富氧燃烧方式下三原子气体辐射特性的计算分析。

1 宽带关联 k 分布模型

k 分布的思想是:将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进行一次强度计算。因其用吸收系数表示辐射特性,故能与任意辐射传递方程求解方法相容。将 k 分布方法应用到整个振动-旋转谱带,并假定在不同压力和温度的 k 分布之间存在着简单的相关,从而得到宽带关联 k 分布模型。

文献^[6]通过考察重要谱带上不同温度下最大普朗克函数 $I_{b\eta,\max}$ 和最小普朗克函数 $I_{b\eta,\min}$ 差值与谱带中心波数 η_0 的普朗克函数 $I_{b\eta,0}$ 的比值 $R_{\text{diff}} = (I_{b\eta,\max} - I_{b\eta,\min})/I_{b\eta,0}$,可以看出 CO₂ 和水蒸气的 R_{diff} 最大值分别可能达到 220%和 2 050%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,在宽带关联 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为

$$f(T, \phi_0, k) = \frac{1}{I_{b\Delta\eta}} \int_{\Delta\eta} I_{b\eta}(T) \delta(k - k_{\eta}(\eta, \phi_0)) d\eta \quad (1)$$

对于只有气体参与的辐射换热,散射常可忽略不计,此时光谱辐射传递方程为

$$\frac{dI_{\eta}}{ds} = k_{\eta}(\eta, \phi) [I_{b\eta}(T) - I_{\eta}] \quad (2)$$

方程(2)两边乘以 Dirac-delta 函数 $\delta(k - k_{\eta}(\eta, \phi_0))$, 然后对整个宽谱带积分,再除以吸收系数概率分布函数 $f(T_0, \phi_0, k)$,则可改写为

$$\frac{dI_g}{ds} = k^*(T, \phi, g) [a(T, T_0, g_0) I_{b\Delta\eta}(T) - I_g] \quad (3)$$

$$a(T, T_0, g_0) = \frac{f(T, \phi_0, k)}{f(T_0, \phi_0, k)}$$

在宽谱带上只要 k 取得相同的 $k_{\eta}(\eta, \phi_0)$, 就有唯一的 $k^*(\phi, k)$ 与 $k_{\eta}(\eta, \phi)$ 相对应。本文在求解方程(3)时,取参考状态 $\phi_0 = \phi$, 则 $a(T, T_0, g_0) = 1$ 。累积分布函数 $g(k)$ 定义如下

$$g(T, \phi_0, k) = \int_0^k f(T, \phi_0, k) dk = \int_0^{k^*} f(T, \phi, k^*) dk^* = g(T, \phi, k^*) \quad (4)$$

利用累积分布函数,混合气体宽谱带辐射强度可表示为

$$I_{\Delta\eta} = \int_{\Delta\eta} I_{\eta} d\eta = \int_0^{\infty} I_k f(T, \phi, k) dk = \int_0^1 I_g dg \quad (5)$$

式(5)常用 Gauss 型的积分方法来计算,本文采用 16 点 Gauss-Lobatto 积分

$$I_{\Delta\eta} = \sum_{i=1}^M \tilde{\omega}_i I_{gi} \quad (6)$$

式中: M 为积分点数; $\tilde{\omega}_i$ 为求积的权.通过分析气体光谱数据库 HITRAN 或者 HITEMP,可以得到吸收系数与累积分布函数的对应关系,然后由方程(3)、(6)就可计算出 $I_{\Delta\eta}$.然而,如果直接从光谱数据库得到累积分布函数与吸收系数之间的关系,计算不仅复杂,而且计算量也非常大.实际上,我们可以从已知的宽带关联 k 分布模型(不带普朗克加权函数的,例如文献[8]中的),通过推导建立起本文带普朗克加权函数的宽带关联 k 分布模型,具体推导过程如下

$$f(T, \phi, k) = \frac{1}{I_{b\Delta\eta}} \int_{\Delta\eta} I_{b\eta}(T) \delta(k - k_{\eta}(\eta, \phi)) d\eta \cong \frac{\Delta\eta}{I_{b\Delta\eta}} \sum_{j=1}^N \frac{I_{bj}}{\Delta\eta_j} \int_{\Delta\eta_j} \delta(k - k_{\eta}(\eta, \phi)) d\eta \cong \frac{\Delta\eta_{bn}}{I_{b\Delta\eta}} f_{wb}(T, \phi, k) \quad (7)$$

$$g(T, \phi, k) = \frac{\Delta\eta_{bn}}{I_{b\Delta\eta}} g_{wb}(T, \phi, k) \quad (8)$$

式中: N 为宽谱带划分成窄谱带的个数; $I_{bj} = \frac{1}{\Delta\eta_j} \int_{\Delta\eta_j} I_{b\eta}(T) d\eta$, $j=1, N$; I_{bn} 为 I_{bj} 在整个宽谱带上的近似值,通过使函数 F 达到最小值来确定

$$F = \sum_{j=1}^N (I_{bj} - I_{bn})^2 \omega_j \quad (9)$$

其中 ω_j 为权重函数,根据每个窄谱带对整个宽谱带发射辐射的贡献来确定

$$\omega_j = \int_{\Delta\eta_j} I_{b\eta}(T) d\eta / I_{b\Delta\eta} \quad j = 1, N \quad (10)$$

关联 k 模型的重点是确定累积分布函数 $g(k)$, 然而从上面的推导可以看出,本文的 $g(T, \phi, k)$ 可

由宽带关联 k 模型(不带普朗克加权函数的)导出.因此,下面将给出采用该模型确定混合气体 $g(k)$ 的计算方法.

2 混合气体宽带累积分布函数 $g(k)$

$g(k)$ 的计算必须要考虑谱带重叠的问题,因为不同气体的吸收谱带在特定的波段范围内往往会相互重叠.图 1 给出了水蒸气和 CO₂ 的光谱吸收系数随波数的变化情况.从图中可以看出,整个谱带大致可以分为 3 类:单一气体参与的谱带(不重叠宽带)、重叠谱带和多谱带合并带.基于上述分类方法,本文将整个谱带分成以下 5 个宽带区域:旋转谱带重叠区域、6.3 μm 谱带不重叠区域、2.7 μm 谱带重叠区域、1.87 μm 谱带重叠区域和 1.38 μm 纯水蒸气谱带区域.其中,6.3 μm 谱带不重叠区域又包括 3 个谱带:6.3 μm 水蒸气谱带、9.4 μm CO₂ 谱带和 4.3 μm CO₂ 多谱带合并带.

2.1 单一气体参与谱带 $g_{sb}(k)$

对于只有单一气体参与的谱带,累积分布函数将以指数宽带模型为基础的有效带宽作相应变换得到,计算结果见文献[7].

2.2 重叠谱带 $g_{ob}(k)$

文献[9]在求解重叠谱带时发现,混合物重叠谱带 $g_{ob}(k)$ 与单一气体的 $g_{sb}(k)$ 在形式上基本相同,只是谱带参数的计算方式不同.下面重点介绍重叠谱带参数的求取方法.基本带宽参数包括积分带强 α 、压力展宽 B 和带宽参数 ω ,具体计算过程如下

$$\alpha = \sum_i x_i \alpha_i; \quad (B\alpha\omega)^{1/2} = \sum_i (x_i B_i \alpha_i \omega_i)^{1/2} \quad x_i = \frac{\rho_i}{\sum_i \rho_i} \quad (11)$$

对于 2.7 μm 重叠谱带和 1.87 μm 重叠谱带,由于 $\eta_{0.1} = \eta_{0.2}$, 所以

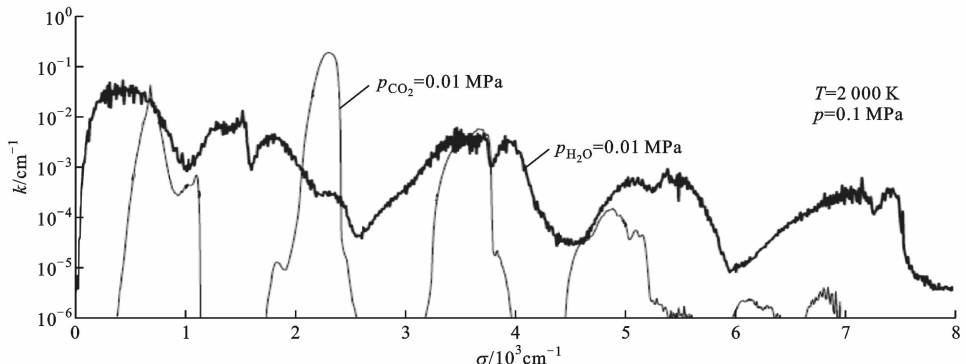


图 1 水蒸气和 CO₂ 的光谱吸收系数随波数 σ 的变化规律

$$\frac{\alpha}{\omega} = \sum_i \frac{x_i \alpha_i}{\omega_i} \quad (12)$$

对于旋转重叠谱带, 因由 3 个谱带重叠而成, 并且 $\eta_{0,1} \neq \eta_{0,2} \neq \eta_{0,3}$, 所以

$$\frac{\alpha}{\omega} = \max(X, Y, Z) \quad (13)$$

$$X = \frac{x_1 \alpha_1}{\omega_1} + \frac{x_2 \alpha_2}{\omega_2} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,1} - \eta_{0,2}|}{\omega_2}\right) +$$

$$\frac{x_3 \alpha_3}{\omega_3} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,1} - \eta_{0,3}|}{\omega_3}\right)$$

$$Y = \frac{x_1 \alpha_1}{\omega_1} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,1} - \eta_{0,2}|}{\omega_1}\right) +$$

$$\frac{x_2 \alpha_2}{\omega_2} + \frac{x_3 \alpha_3}{\omega_3} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,2} - \eta_{0,3}|}{\omega_3}\right)$$

$$Z = \frac{x_1 \alpha_1}{\omega_1} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,1} - \eta_{0,3}|}{\omega_1}\right) +$$

$$\frac{x_2 \alpha_2}{\omega_2} \exp\left(-\frac{2|\eta_{0,3} - \eta_{0,2}|}{\omega_2}\right) + \frac{x_3 \alpha_3}{\omega_3}$$

2.3 CO₂ 4.3 μm 多谱带合并带 $g_{mb}(k)$

对于 CO₂ 的 4.3 μm 谱带(1 950~2 400 μm), 由于其为 3 个谱带合并在一起的, 此时累积分布函数由下式求取

$$g_{mb}(k) = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta \eta_i}{\Delta \eta} g_i(k) \quad (14)$$

式中: $\Delta \eta = \eta_{up} - \eta_{low}$ 为谱带上下限之差, cm^{-1} ; $g_i(k)$ 的计算方法同单一气体谱带。

当系统温度和压力发生较大变化时, 3 个谱带间的相互影响会导致系数 $\Delta \eta_i / \Delta \eta$ 有较大的变化, 故本文建立新的分段模型如下

$$\frac{\Delta \eta_i}{\Delta \eta} = \begin{cases} 0, & \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \ln\left(\frac{s_{\max,i}}{s_{\max,i+1}}\right) \leq -\frac{\Delta \eta}{\omega_{0,i+1}} \\ \frac{(T/T_0)^{1/2} \ln(s_{\max,i}/s_{\max,i+1}) + \Delta \eta / \omega_{0,i+1}}{\Delta \eta (1/\omega_{0,i} + 1/\omega_{0,i+1})}, & -\frac{\Delta \eta}{\omega_{0,i+1}} < \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \ln\left(\frac{s_{\max,i}}{s_{\max,i+1}}\right) < \frac{\Delta \eta}{\omega_{0,i}} \\ 1, & \frac{\Delta \eta}{\omega_{0,i}} \leq \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \ln\left(\frac{s_{\max,i}}{s_{\max,i+1}}\right) \end{cases} \quad (15)$$

该模型考虑了在不同的温度和压力下 3 个谱带中相邻谱带间的影响。

系统温度和压力对宽带累积分布函数的影响主要通过改变各个参与谱带的基本带宽模型参数来实现, 参数 α 、 B 和 ω 的计算公式见文献[10]。

3 离散坐标法

离散坐标法^[11]的基本思路是, 在 4π 立体角内对辐射传递方程沿有限个坐标方向进行离散, 以构成沿各方向的有限差分方程组, 在求得数值解之后, 总辐射强度则可用各方向辐射强度之和来近似。针对一维辐射换热问题, 给出辐射传递方程的具体离散过程

$$\mu_m \frac{\partial I(g_i)_m}{\partial x} = k(I_b - I(g_i)_m) \quad (16)$$

式中: 方向余弦 μ_m 及其权 ω_m 的取值见文献[11]。在微元控制体上积分式(16)可得

$$\mu_m (I_{m,i+1/2} - I_{m,i-1/2}) = k \Delta x (I_{b,i} - I_{m,i}) \quad (17)$$

假设微元体界面上的辐射强度与微元体中心的辐射强度间存在某种关联, 即构成某种空间差分格式, 差分因子 f 采用指数格式, 如

$$I_{m,i} = f_{m,x} I_{m,i+1/2} + (1 - f_{m,x}) I_{m,i-1/2} \quad (18)$$

把方程(18)代入方程(17), 消去下游边界的辐射强度项得

$$I_{m,i} = \frac{\mu_m I_{m,i-1/2} + k I_{b,i} \Delta x f_{m,x}}{\mu_m + k \Delta x f_{m,x}} \quad (19)$$

离散坐标方程(19)可采用逐点推进的方法求解, 一般从辐射传递方向的上游边界开始, 由节点上游界面强度利用式(19)计算节点处的强度, 再由式(18)计算节点下游界面强度, 并以此作为下一节点的上游界面强度, 按此逐点推进。混合气体辐射强度可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} I_{\Delta \eta, m}(s) &= \sum_{i=1}^n \tilde{\omega}_i I_{\Delta \eta, m, g_i} \\ I(s) &= \sum_{\Delta \eta} \sum_m \omega_m I_{\Delta \eta, m} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

4 模型检验与分析

采用离散坐标法对实际锅炉进行辐射换热计算时, 需将每个网格离散成 3 个计算方向, 而每个方向上的计算方法与一维模型基本相同, 所以本文以一维无限大平行平板间等温烟气层为例, 计算了混合气体的累积分布函数和辐射强度, 并与逐线计算(LBL)、全光谱关联 k 分布模型(FSCK)和基于指数的宽带关联 k 模型(EWBCk)^[12-13]的计算结果进行了比较。算例中平板为黑体且温度均为 0 K, 烟气的主要成分如表 1 所示^[14]。选取板内压力为 0.1、0.5、1.0、1.5 MPa 4 个工况分别进行计算, 射线行程长度取为 10 m, 沿气体层厚度方向分为 600 个单元, 角度分为 12 个单元立体角。

表 1 30%O₂/70%CO₂ 燃烧方式下烟气中
各成分的体积分数 %

$\varphi(\text{CO}_2)$	$\varphi(\text{H}_2\text{O})$	$\varphi(\text{N}_2)$	$\varphi(\text{SO}_2)$	$\varphi(\text{O}_2)$
75.80	21.79	0.14	0.07	2.20

考虑在富氧燃烧方式下,炉膛理论燃烧温度可达 2 000 K 甚至更高,图 2 给出了温度为 2 000 K 时 CO₂ 4.3 μm 谱带在 $p=0.1, 0.5, 1.0, 1.5$ MPa 下的吸收系数 k 和累积分布函数的对应关系. 本文选逐线计算为参考模型,所以相对误差定义为 $\left| \frac{g_{\text{model}} - g_{\text{LBL}}}{g_{\text{LBL}}} \right|$,文中的计算模型简写为 NWBCK. 表 2 给出了不同压力下 3 种计算模型累积分布函数相对误差的均方根.

表 2 不同压力下 3 种模型累积分布函数
相对误差的均方根 %

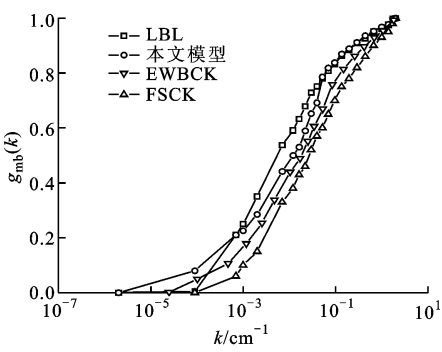
模型名称	相对误差均方根			
	0.1 MPa	0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa
本文模型	5.97	13.53	9.46	9.35
EWBCK	8.35	28.63	29.56	35.64
FSCK	14.91	38.26	39.92	43.52

图 3 给出了水蒸气和 CO₂ 混合气体不同压力下 $L=10$ m 处辐射强度随温度的变化规律,表 3 给出了不同压力下 3 种计算模型辐射强度相对误差的均方根.

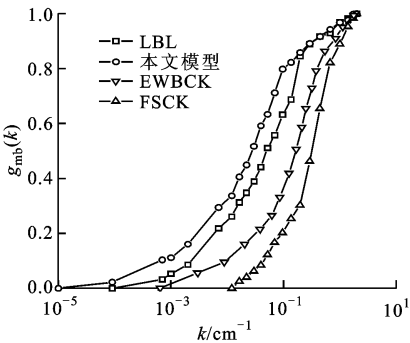
表 3 不同压力下 3 种模型辐射强度相
对误差的均方根 %

模型名称	相对误差均方根			
	0.1 MPa	0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa
本文模型	3.20	6.86	7.83	9.80
EWBCK	7.89	20.67	31.25	39.87
FSCK	9.86	30.58	42.36	49.37

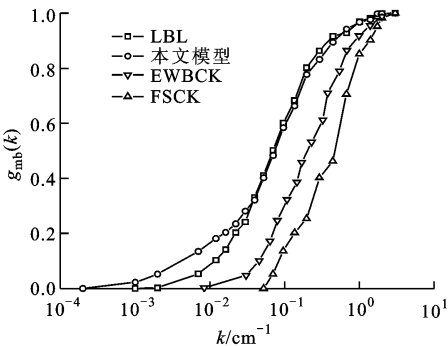
图 2、3 中 LBL 和 EWBCK 的计算结果来自本课题组已发表的文献[7]中,FSCK 的计算结果来自本文的计算. 从上面的计算可以看出,在常压(0.1 MPa)下,与 LBL 相比,各个模型的计算结果精度相当,但随着压力的逐渐增加,本文提出的宽带关联 k 模型与 LBL 所得的结果吻合较好,而其他模型却产生了较大的偏差,由表 2、3 同样也可看出. 这是因为 EWBCK 在计算混合气体累积分布函数时采用固定带宽,即各个谱带的波数上下限之差取为常量,并且随后的吸收系数 k 的计算也采用固定带宽,这样不



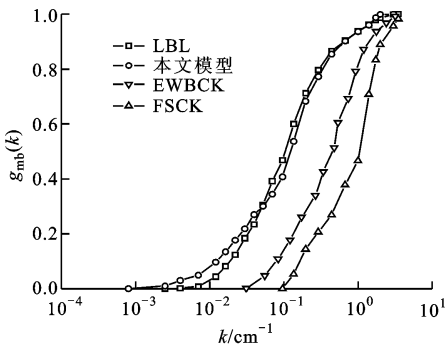
(a) $p=0.1$ MPa



(b) $p=0.5$ MPa



(c) $p=1.0$ MPa

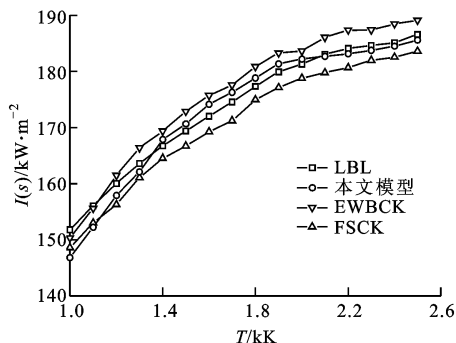
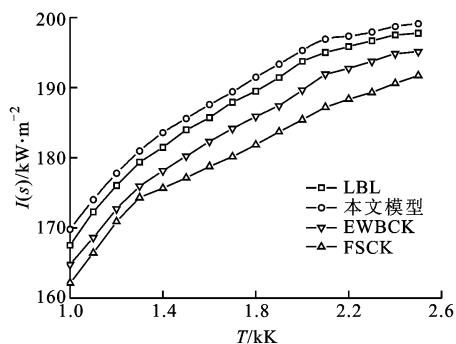
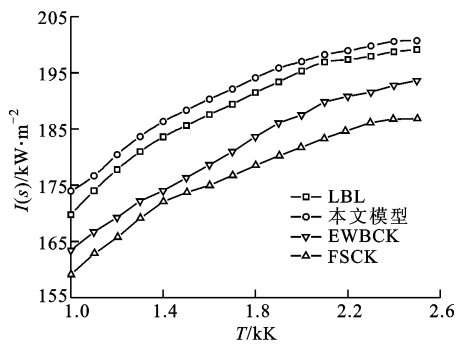
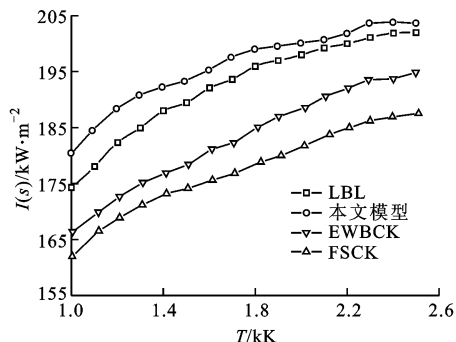


(d) $p=1.5$ MPa

图 2 不同压力下 CO₂ 4.3 μm 谱带的累积分布函数

仅使 k 的计算不准确,还将引起方程(2)中 I_η 和 $k_\eta(\eta, \phi)$ 两个量之间的矛盾. FSCK 在混合气体温度和压力变化剧烈时,由于“热线”的存在,使得对于整

个光谱而言,关联 k 假设完全失效,从而产生了很大的误差. 如果将本文的计算模型应用到实际增压富氧锅炉炉膛传热计算中,虽然由吸收系数误差引起的受热面布置的计算误差随压力的增加而增加,但在1.5 MPa时也仅约为8%.

(a) $p=0.1$ MPa(b) $p=0.5$ MPa(c) $p=1.0$ MPa(d) $p=1.5$ MPa图3 CO_2 和水蒸气混合气体在不同压力下的辐射强度

5 结 论

本文建立的带有普朗克函数加权的宽带关联 k 分布模型以及给出的数值解法的计算过程,可以比较方便地用于增压富氧燃烧方式下烟气的辐射换热计算. 通过计算不同温度(1 000~2 500 K)和压力(0.1~1.5 MPa)下一维平行平板间混合气体的累积分布函数和辐射强度,并与文献中的模型相比,发现本模型不仅计算收敛快,而且具有合理的计算精度. 因此,本文对增压富氧燃烧方式下炉内辐射换热特性的研究及炉膛的设计具有重要的参考价值.

参考文献:

- [1] 阎维平. 洁净发电技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2008:217-222.
- [2] JONGSUP H, RANDALL F, MARCO G, et al. Operating pressure dependence of the pressurized oxy-fuel combustion power cycle[J]. Energy, 2010, 35(12): 5391-5399.
- [3] ROTHMAN L S, CAMY P C, FLAUD J M, et al. HITRAN, the high temperature molecular spectroscopic database 2000[EB/OL]. [2010-10-20]. <http://www.hitran.com>.
- [4] DENISON M K, WEBB B W. The spectral line-based weighed-sum-of-gray-gases model in nonisothermal nonhomogeneous media[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1995, 117(2): 359-365.
- [5] LIU F, SMALLWOOD G J, GULDER O L. 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(17): 3119-3135.
- [6] 尹雪梅,刘林华,李炳熙. 水蒸气和 CO_2 混合气体辐射特性宽带 k 分布模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 63-68.
- [7] YIN Xuemei, LIU Linhua, LI Bingxi. A wide band k -distribution model for the radiative property of water vapor and carbon dioxide gas mixture[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 63-68.
- [8] 米翠丽,阎维平. 增压富氧燃烧烟气辐射特性宽带关联 k 模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 62-68.
- [9] MI Cuili, YAN Weiping. A wide band correlated k -distribution model for the gas radiative property under pressurized oxygen-enriched combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(29): 62-68.
- [10] MARIN O, BUKIUS R O. A simplified wide band

- model of the cumulative distribution function for water vapor[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(19): 2877-2892.
- [9] HE J, CHENG W L, BUCKIUS R O. Wide band cumulative absorption coefficient distribution model for overlapping absorption in H₂O and CO₂ mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5): 1115-1129.
- [10] JING H, RICHARD O, BUCKIUS R O. Improved band parameters for a simplified wide band cumulative absorption coefficient distribution model for H₂O and CO₂ [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5): 1467-1474.
- [11] LOVE T J, GROSH R J. Radiative heat transfer in absorbing, emitting and scattering media [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1965, 87(2): 161-166.
- [12] 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[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(17): 3127-3134.
- [13] MODEST M F. Narrow-band and full-spectrum k -distribution radiative heat transfer-correlated- k vs. scaling approximation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 76(1): 69-83.
- [14] ROBERT J, ANDERSSON K, LECKNER B, et al. Models for gaseous radiative heat transfer applied to oxy-fuel conditions in boilers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(6): 220-230.

(编辑 荆树蓉)