

高海拔低气压条件下烟气辐射特性

车得福¹, 姚峤鹏¹, 王 津¹, 董凌霄¹, 于吉明², 笪耀东^{1,2}, 邓 磊¹

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘 要:高原地区特殊的地理环境导致锅炉运行出现出力不足、排烟温度高等一系列问题。采用逐线法 (Line-By-Line method, LBL), 基于 HITEMP2010 光谱数据库 (High-temperature molecular spectroscopic database), 求解 3 组不同气压条件下 (0.101 325、0.076 622 和 0.061 655 MPa) 空气燃烧方式的烟气吸收系数和总发射率, 分析了压力、温度和水蒸气与 CO₂ 的摩尔比对烟气辐射特性的影响, 改进了灰气体加权和 (Weighted-Sum-of-Gray-Gases, WSGG) 模型关联式, 建立了适用于低气压条件下的 WSGG 模型参数。结果表明, 压力的降低会减小烟气的总发射率, 4 种工况下压力从 0.101 325 MPa 下降到 0.061 655 MPa 时, 总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.093 4、0.084 5、0.091 1 和 0.084 3。在小行程长度下, 摩尔比越大, 压力的变化对总发射率的影响越大, 而大行程长度下则相反。温度的升高会减小烟气的总发射率, 4 种工况下, 温度从 1 000 K 升到 2 500 K 时, 总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.273 6、0.270 5、0.251 5 和 0.250 5。在小行程长度下, 摩尔比越大, 温度的变化对总发射率的影响越大, 在大行程长度下则相反。摩尔比的增加会增大烟气的总发射率, 4 种工况下摩尔比从 1 增加到 2 时, 总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.088 1、0.100 4、0.088 9 和 0.100 6。在小行程长度下, 温度越高或压力越低, 摩尔比变化对总发射率的影响越小, 在大行程长度下则相反。改进后的 WSGG 模型在不同工况下烟气总发射率的最大相对误差为 3.67%, 相比现有基于常压条件下开发的 WSGG 模型外推到低压条件的误差有明显降低, 表明改进后的 WSGG 模型更适用于低气压空气燃烧气氛。

关键词: 烟气辐射; 高海拔; 低气压; 锅炉; 总发射率

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-1025-12

Radiative properties of flue gas under high-altitude sub-atmospheric pressure

CHE Defu¹, YAO Qiaopeng¹, WANG Jin¹, DONG Lingxiao¹, YU Jiming², DA Yaodong^{1,2}, DENG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The special geography of the plateau area leads to a series of problems in boiler operation. In this study, the absorption coefficients and total emissivity of flue gas were determined under different air pressures during air combustion using the Line-By-Line (LBL) method based on the HITEMP2010 database (High-temperature molecular spectroscopic database). The effects of pressure, temperature, and molar fraction (H₂O and CO₂) on the radiative properties of flue gas were analyzed. An improved Weighted-Sum-of-Gray-Gases (WSGG) correlation, which relates the absorption coefficients to temperature and total pressure, was proposed. The results show that the reduced total pressure diminishes the total

收稿日期: 2023-08-16 修回日期: 2023-10-22 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ23.1000

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFF0600603)

作者简介: 车得福 (1962—), 男, 吉林德惠人, 教授, 博士生导师。E-mail: dfche@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者: 邓 磊 (1983—), 男, 湖北荆门人, 副教授, 博士生导师。E-mail: leideng@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 车得福, 姚峤鹏, 王津, 等. 高海拔低气压条件下烟气辐射特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1025-1036.

CHE Defu, YAO Qiaopeng, WANG Jin, et al. Radiative properties of flue gas under high-altitude sub-atmospheric pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1025-1036.



移动阅读

emissivity of flue gas. The maximum differences in total emissivity along the path lengths for the four working conditions with a pressure drop from 0.101 325 to 0.061 655 are 0.093 4, 0.084 5, 0.091 1, and 0.084 3, respectively. For a larger molar fraction, the effect of pressure on the total emissivity is greater for shorter path lengths but not for longer ones. Similarly, the higher temperature would reduce the total emissivity of flue gas. The maximum differences in total emissivity along the path lengths for the four working conditions with a temperature increase from 1 000 K to 2 500 K are 0.273 6, 0.270 5, 0.251 5, and 0.250 5, respectively. For a larger molar fraction, temperature has a greater effect on the total emissivity for shorter path lengths but not for longer ones. Furthermore, increasing the molar fraction enhances the total emissivity of flue gas. The maximum differences in total emissivity along the path lengths for the four working conditions with a molar fraction increase from 1 to 2 are 0.088 1, 0.100 4, 0.088 9, and 0.100 6, respectively. For a higher temperature or lower pressure, the effect of molar fraction on the total emissivity is smaller for shorter path lengths but greater for longer ones. The maximum relative error of the improved WSGG model for the total emissivity of flue gas under different working conditions is 3.67%. It is a significant reduction in the error compared to that of the existing WSGG model. Therefore, the improved WSGG model is more accurate for air combustion atmosphere and sub-atmospheric pressure.

Key words: flue gas radiation; high-altitude; sub-atmospheric pressure; boiler; total emissivity

我国高原广阔,涉及青藏川滇多个省份,海拔 1 000 m 以上的高原地区约占国土面积的 58%,2 000 m 以上的高原地区约占 33%。特殊的地理条件造就了高原地区低气压和低含氧量的环境,导致该地区锅炉的运行出现排烟温度过高、燃烧效率下降等问题^[1-3]。燃烧现象涉及流动、传热和化学反应等复杂过程,燃烧设备中的热交换以辐射换热为主,其与烟气的辐射特性密切相关。以锅炉为例,在炉膛水冷壁和火焰之间的热量传递中,辐射换热约占总传热量的 95%^[4],且该份额随着炉膛尺寸的增大而增加,准确的辐射换热量对炉膛整体的传热计算具有重要意义。低气压条件下烟气的辐射特性(碳黑颗粒、焦炭颗粒和三原子气体)发生变化,因此改进现有常压下的烟气辐射模型对于求解辐射传热问题至关重要^[1-3]。本文关注烟气中三原子气体(H₂O 和 CO₂)辐射特性的变化。

对于非灰气体辐射特性的研究,已经发展出各类光谱模型^[5],模型之间的区别在于光谱分辨率(波数间距)的不同。根据选取的波数间距可分为逐线法(Line By Line method, LBL)^[6-7]、窄谱带模型(Narrow Band Models)^[8-10]、宽谱带模型(Wide Band Models)^[11-12]和总体模型(Global Models)^[13-15]。根据求解的辐射特性参数可分为 2 类^[16-17]:一类是求解吸收系数,适用于微分或积分形式的辐射传输方程,如逐线法和总体模型;另一类是求解透射率,适用于积分形式的辐射传输方程^[18],如窄谱带模型和宽谱带模型。逐线法是目前研究非灰气体辐射特性精度最高的模型,一般作为基准模型来验证各种光谱模型的准确性^[19-22]。总体模型是针对工程问题所建立的假想近似模型,其中灰气体加权和(Weighted Sum of Gray Gases, WSGG)模

型^[14]由于具有高精度、高效率特点,在计算流体动力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)中广泛应用。

近年来,国内外学者针对烟气辐射特性展开广泛研究。以逐线法或谱带模型为基准,修正适用于不同工况的 WSGG 模型参数。BAHADOR 等^[23]基于 HITEMP 光谱数据库拟合了从 0.10~1.52 MPa 的 WSGG 模型参数,研究了总压和分压对混合气体总发射率的影响。YIN 等^[24]利用指数宽谱带模型拟合适用于空气燃烧和富氧燃烧方式的 WSGG 模型参数,提出特定表格法将修正后的 WSGG 模型应用于 CFD 计算。JOHANSSON 等^[25]将 H₂O 和 CO₂ 的摩尔比引入 WSGG 模型关联式,基于统计窄谱带模型拟合了 WSGG 模型参数。KANGWANPONGPAN 等^[26]基于 HITEMP2010 光谱数据库利用 LBL 法计算多个摩尔比下的混合气体发射率,采用 Levenberg-Marquardt 算法拟合 WSGG 模型参数。DORIGON 等^[27]和 BORDBAR 等^[28]采用 LBL 法分别拟合出考虑 2 种混合气体分压比 $P(\text{H}_2\text{O})/P(\text{CO}_2)$ 分别为 1 和 2 时的 WSGG 模型参数,并将拟合出的模型应用于燃油和甲烷燃烧模型。BORDBAR 等^[29]基于 HITEMP2010 光谱数据库开发了适用于高压条件下的 WSGG 模型系数,并关注了低于大气压条件下的 WSGG 模型。

目前关注低气压条件下烟气辐射特性的研究较少^[29-37]。由 SMITH 等^[14]建立的常压(0.1 MPa)空气燃烧气氛的 WSGG 模型应用广泛,可通过改变压力项外推到不同气压条件下进行计算。但 CHU 等^[38]通过改变压力项将 WSGG 模型外推到高压下计算,所选取的 WSGG 模型系数由 BORDBAR 等^[28]基于常压条件下开发,并与 LBL 的计算相比较,结果表明该推

广算法在高压下存在较大误差。因此,不能简单的通过改变压力项将现有常压条件下的 WSGG 模型系数应用到低压条件下进行计算。关于 WSGG 模型关联式,现有的多数研究在开发 WSGG 模型系数时近似认为吸收系数是定值,仅将其表达为与水蒸气和二氧化碳的摩尔比相关的函数。

笔者基于的 HITEMP2010 光谱数据库^[39],采用 LBL 法计算烟气的吸收系数和总发射率,选取的工况条件覆盖不同海拔高度下的大气压力和绝大多数类型的燃烧设备。考虑到吸收系数与压力和温度间的相关性,改进了 WSGG 模型关联式,并基于 LBL 法的计算结果开发了低气压空气燃烧的 WSGG 模型系数,相比传统基于常压条件下开发的 WSGG 模型系数更适用于低气压条件下的燃烧。

1 烟气辐射特性计算模型

1.1 逐线法

气体的吸收和发射由分子能级跃迁造成,不同振动能级间的跃迁形成谱带,不同转动能级间的跃迁形成谱线,2 种跃迁同时发生形成振动-转动带。成千上万的谱线在光谱上紧密排列,光谱吸收系数剧烈变化。LBL 法建立了光谱特性参数和气体辐射特性参数之间的关系,在波数 η 处,光谱吸收系数 κ_η 为该处所有相互重叠的谱线的吸收系数 $\kappa_{i,\eta}$ 之和,其表达式^[6-7]为

$$\kappa_\eta = N_{\text{mol}} \sum_i S_i(T) f_i(\eta) \quad (1)$$

式中, N_{mol} 为分子数密度; $S_i(T)$ 为第 i 条谱线的谱线强度, cm^{-2} ; $f_i(\eta)$ 为第 i 条谱线的线形函数。

$$N_{\text{mol}} = \frac{A_v P_s / 1.013 \ 25}{R T} \quad (2)$$

式中, A_v 为阿伏伽德罗常数, $A_v = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}$; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$; T 为温度, K ; P_s 为参与辐射的气体分压, MPa 。

采用洛伦兹线形,其表达式^[3]为

$$f_i(\eta) = \frac{\gamma_i}{\pi [\gamma_i^2 + (\eta - \eta_i)^2]} \quad (3)$$

式中, γ_i 为第 i 条谱线的谱线半宽, cm^{-1} ; η_i 为第 i 条谱线中心处的波数, cm^{-1} 。

$$\gamma_i(P, P_s, T) = \left(\frac{T_0}{T} \right)^n [\gamma_{\text{air},i}(T_0, P_0)(P - P_s) + \gamma_{\text{self},i}(T_0, P_0)P_s] \quad (4)$$

式中, T_0 和 P_0 分别为参考温度和参考压力,对于 HITEMP2010 数据库, $T_0 = 296 \text{ K}$, $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$; $\gamma_{\text{air},i}$ 和 $\gamma_{\text{self},i}$ 分别为空气展宽和自身展宽, $(\text{cm} \cdot \text{MPa})^{-1}$; P 为

参与辐射的总压, MPa 。

在温度为 T 时, $S_i(T)$ 可由参考状态谱线强度 $S_i(T_0)$ 外推得到,其表达式^[40]为

$$S_i(T) = S_i(T_{\text{ref}}) \frac{Q_v(T_{\text{ref}}) Q_r(T_{\text{ref}})}{Q_v(T) Q_r(T)} \frac{\exp\left(\frac{hcE''}{k_B T_{\text{ref}}}\right) 1 - \exp\left(-\frac{hc\eta_i}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{hcE''}{k_B T}\right) 1 - \exp\left(-\frac{hc\eta_i}{k_B T_{\text{ref}}}\right)} \quad (5)$$

式中, Q_v 和 Q_r 分别为振动配分函数和转动配分函数; h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为真空中的光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$; k_B 为玻尔兹曼常数, $k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; E'' 为低态能级, cm^{-1} 。

特定行程长度 L 上的辐射强度 I 由光谱辐射强度 $I_{b,\eta}$ 在整个波数范围内积分得到,其表达式为

$$I(L) = \int_\eta I_{b,\eta} [1 - \exp(-\kappa_\eta L)] d\eta \quad (6)$$

总发射率为同温度下的辐射强度和黑体辐射强度之比,其表达式为

$$\varepsilon(L) = \pi \frac{I(L)}{\sigma T^4} \quad (7)$$

其中, σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K}$ 。

本文 η 取 $0 \sim 10 \ 000 \text{ cm}^{-1}$, 光谱间隔取 0.01 cm^{-1} , 谱线展宽取 500 cm^{-1} , P 取 $0.101 \ 325$ 、 $0.076 \ 622$ 和 $0.061 \ 655 \text{ MPa}$, 分别代表海拔高度 $0 \sim 4 \ 000 \text{ m}$ 的大气压力。温度 T 的取值范围为 $300 \sim 3 \ 000 \text{ K}$, 温度间隔为 100 K 。行程长度 L 的取值范围为 $0.001 \sim 60 \text{ m}$, 间隔为 0.1 m 。温度和行程长度的取值覆盖了大多数燃烧设备的温度和尺寸。水蒸气和二氧化碳的摩尔比 $M = Y(\text{H}_2\text{O})/Y(\text{CO}_2) = 1, 2$, 当 $M = 1$ 时, $Y(\text{H}_2\text{O}) = 0.1$, $Y(\text{CO}_2) = 0.1$, 代表燃油等液体燃料燃烧的典型产物。当 $M = 2$ 时, $Y(\text{H}_2\text{O}) = 0.2$, $Y(\text{CO}_2) = 0.1$, 代表甲烷等气体燃料燃烧的典型产物,烟气的其余部分是由不具有辐射能力的透明气体组成,如空气或氮气。

1.2 灰气体加权和模型及新关联式

WSGG 模型用一组数量为 i 的灰气体近似真实非灰气体的辐射 (H_2O 和 CO_2), 其中每个灰气体的吸收系数 κ_i 在光谱区域是与波数 η 无关的常数。WSGG 模型在行程长度 L 上的总发射率^[14]为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n w_i [1 - \exp(-\kappa_i Y_i PL)] \quad (8)$$

式中, κ_i 为第 i 种灰气体的吸收系数, $(\text{m} \cdot \text{MPa})^{-1}$; Y_i 为水蒸气和二氧化碳的摩尔分数之和, $Y_i = Y(\text{H}_2\text{O}) + Y(\text{CO}_2)$; w_i 为第 i 种灰气体的权重系数,是与温度 T 相

关的多项式函数。

真实非灰气体辐射存在透明窗口效应,因此引入一种白气体,假设白气体的权重为 w_0 ,对应的吸收系数 $\kappa_i=0$,则

$$\sum_{i=0}^n w_i = 1 \quad (9)$$

一般情况下, w_i 为温度 T 的 $j-1$ 次多项式,其表达式为

$$w_i = \sum_{j=1}^n c_{i,j} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{j-1} \quad (10)$$

其中, $c_{i,j}$ 为无量纲的多项式系数; T_{ref} 为参考温度,一般取 1 200 K^[26]。引入 T_{ref} 使多项式系数无量纲化,从而提高精度减小误差。

$c_{i,j}$ 和 κ_i 与水蒸气和二氧化碳的摩尔比 M 有关,可通过多项式进行拟合^[25, 28],其表达式^[23]为

$$c_{i,j} = C_{1i,j} + C_{2i,j}M + C_{3i,j}M^2 \quad (11)$$

$$\kappa_i = K_{1i} + K_{2i}M + K_{3i}M^2 \quad (12)$$

其中, C 、 K 为多项式系数。式(8)中存在压力项 P ,可应用现有基于常压下开发的各类 WSGG 模型系数,通过改变该项外推到不同气压条件下进行计算。但 CHU 等^[38]选取了由 BORDBAR 等^[23]基于常压条件下开发的 WSGG 模型系数,将其外推到高压条件下计算,并与 LBL 法的计算相比较,结果表明外推算法在高压下存在较大误差。因此有必要基于低气压条件下 LBL 法的计算结果,重新开发低气压条件下的 WSGG 模型系数。根据式(8)~(12)可得,拟合过程将 κ_i 视为定值,忽略 κ_i 随压力 P 和温度 T 而变化,仅将其表达为与摩尔比 M 相关的多项式。本文进一步考虑吸收系数与压力和温度间的相关性,将压力项 P 与吸收系数 κ_i 相结合表示为 $\kappa_{P,i}$,同时将 $\kappa_{P,i}$ 视为温度的多项式函数 $\kappa_{P,T,i}$,以提高精度。改进后的 WSGG 模型关联式表达为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n w_i [1 - \exp(-\kappa_{P,T,i} Y_t L)] \quad (13)$$

$$\kappa_{P,T,i} = \sum_{j=1}^n d_{i,j} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{j-1} \quad (14)$$

$$d_{i,j} = D_{1i,j} + D_{2i,j}M + D_{3i,j}M^2 \quad (15)$$

式中, $\kappa_{P,T,i}$ 为第 i 种灰气体的吸收系数, m^{-1} , 与压力和温度相关; $d_{i,j}$ 为多项式系数, m^{-1} ; D 为系数。

本文中,灰气体数量 i 取 4,多项式系数 j 取 6,参

考温度 T_{ref} 为 1 200 K,上述取值参考了文献^[25-26],满足精度要求。

2 烟气辐射特性计算结果及分析

2.1 逐线法验证

本采用自编程进行 LBL 法计算,为了验证程序的准确性,与前人^[26, 28]的结果进行比较。验证工况为常压下富氧燃烧气氛,烟气中只含有水蒸气和二氧化碳,2者的摩尔分数之和 $Y_t=1$,2者的摩尔比 $M=0.125$,行程长度 L 分别为 1、10 和 60 m。图 1 为不同行程长度下烟气的总发射率随温度的变化。本文结果与 BORDBAR 等^[26]的结果吻合较好,而与 KANGWANPONGPAN 等^[24]的结果存在部分偏差。偏差的原因可能在于选取的谱线展宽不同。本文计算所采用的谱线展宽 500 cm^{-1} ,这与文献^[26]采用的谱线展宽一致。因此可认为本文使用的 LBL 法的计算程序及结果可靠。

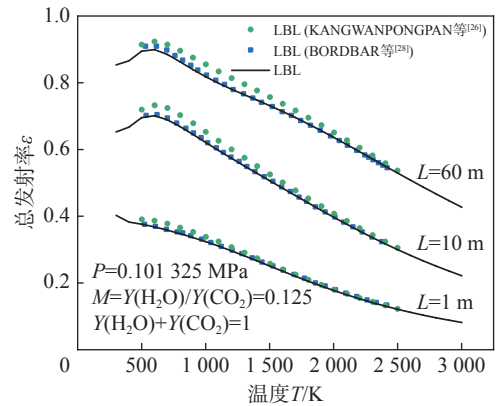


图 1 LBL 法计算的总发射率与文献结果对比

Fig.1 Comparison between emissivity calculated by LBL method and results in previous studies

2.2 压力对烟气辐射特性的影响

图 2 为烟气的总发射率 ε 在不同水蒸气与二氧化碳的摩尔比 ($M=1, 2$) 和温度 ($T=1\ 000, 2\ 000 \text{ K}$) 下,压力 P 从 0.101 325 降至 0.061 655 MPa 时的变化。从图 2(a)~(d) 可以看出,对于摩尔比和温度相同的工况,随着压力的降低,烟气的总发射率减小,表明压力降低减弱了烟气的辐射特性。对于 4 种不同工况,压力从 0.101 325 下降到 0.061 655 MPa 时,烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.093 4、0.084 5、0.091 1 和 0.084 3,其原因为:根据式(2),压力的降低引起了分子数密度 N_{mol} 的变化。此外,碰撞增宽与分子数密度 N_{mol} 和分子平均速度密切相关,而洛伦兹线形主要考虑碰撞增宽,从而谱线线形受到影响。因此,根据式(1),光谱吸收系数 κ_{η} 会随压力的降低而减小,同时根据式(6)、(7),烟气的总发射率也会相应减小。

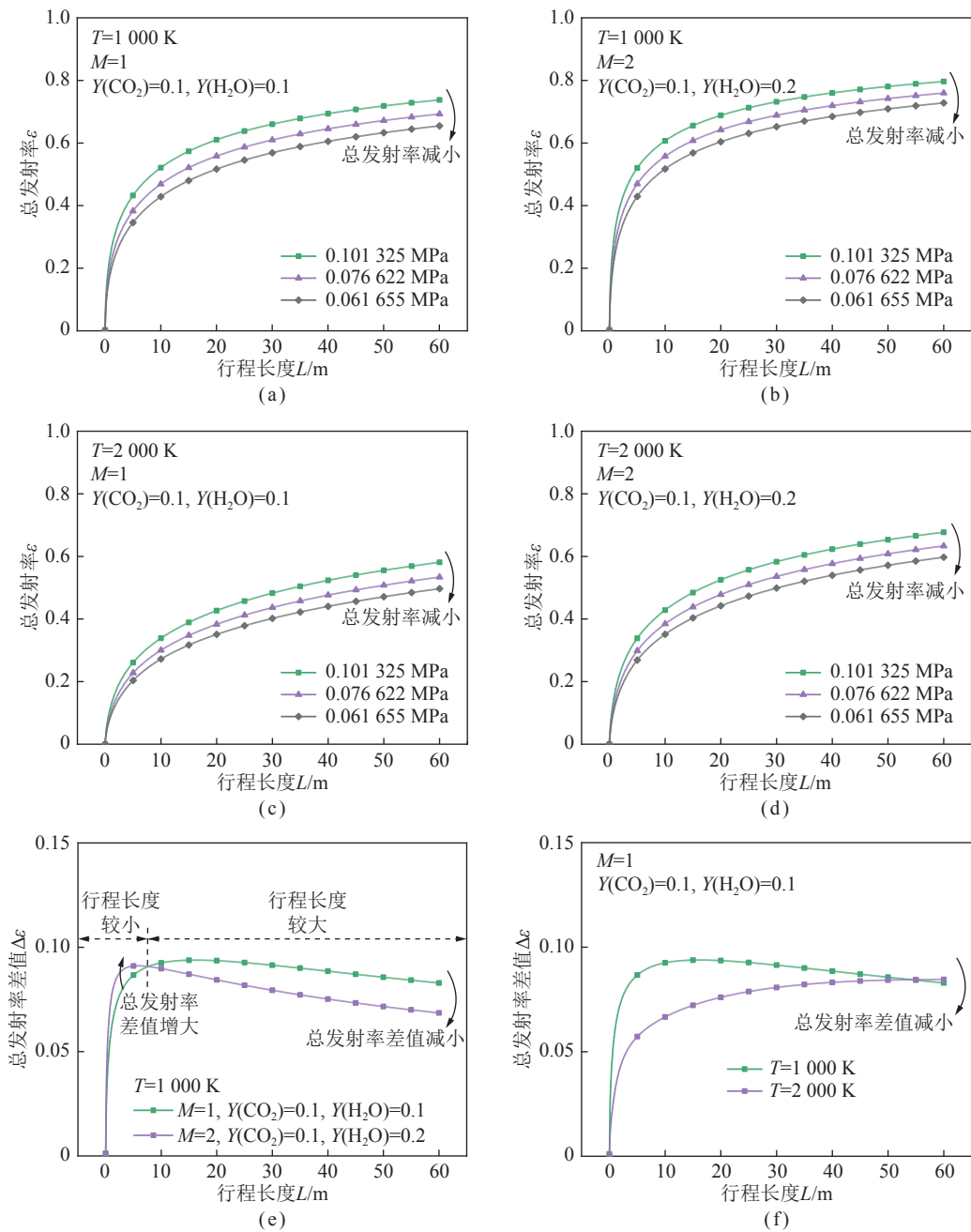


图 2 压力对总发射率的影响
Fig.2 Influence of pressure on total emissivity

由图 2(e) 可以看出, 在相同的压力变化范围内, 当行程长度较小时, 随着摩尔比的增加, 烟气的总发射率差值 $\Delta\epsilon$ ($\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$, ϵ_1 、 ϵ_2 分别为 0.101 325 和 0.061 655 MPa 时的总发射率) 增大, 表明压力变化对烟气总发射率的影响作用增强; 当行程长度较大时, 随着摩尔比的增加, 烟气的总发射率差值减小, 表明压力变化对烟气总发射率的影响作用减弱。可能的原因是在较短行程长度情况下, 分子之间的碰撞频率可能较高, 导致烟气的总发射率受到更强的压力变化影响; 而在较长行程情况下, 分子碰撞的影响可能相对较小。由图 2(f) 可以看出, 随着温度的升高, 相同

压力变化范围内烟气的总发射率差值减小, 即压力变化对烟气总发射率的影响作用减弱。BAHADOR 等^[22] 在增大气压条件下也得到了类似的结论。综上, 对于空气燃烧气氛, 压力的降低减弱了烟气的辐射特性; 摩尔比越大, 在行程长度较小的情况下这种减弱的趋势较明显, 但在行程长度较大的情况下这种减弱的趋势较不明显; 温度升高, 这种减弱的趋势受抑制。

2.3 温度对烟气辐射特性的影响

图 3 为水蒸气和二氧化碳的摩尔比 M 为 1、2, 压力 P 为 0.101 325、0.061 655 MPa 的条件下, 温度 T 从 1 000 升高到 2 500 K 对烟气的总发射率的影响。

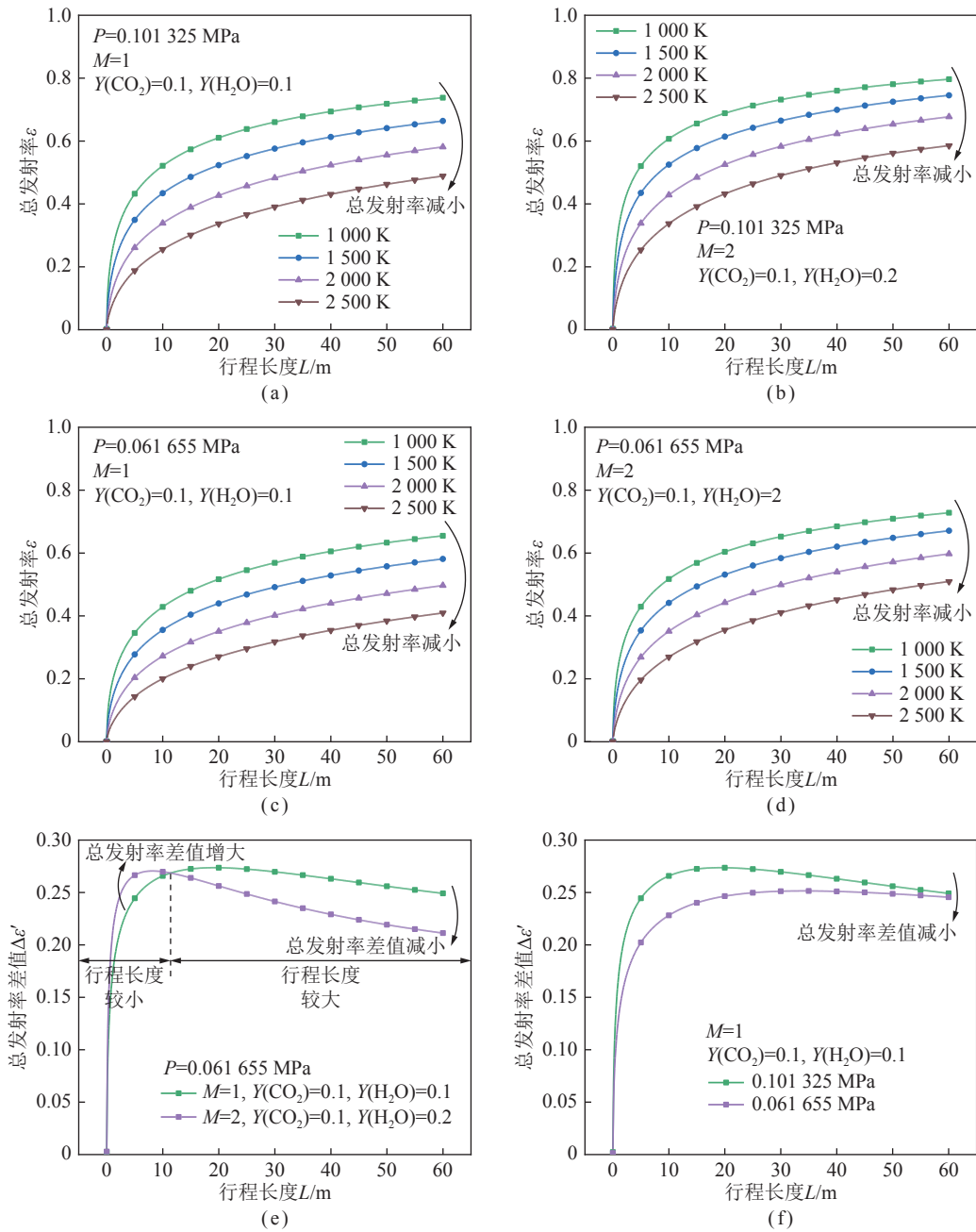


图3 温度对总发射率的影响

Fig.3 Influence of temperature on total emissivity

由图3(a)~(d)可以得到,在摩尔比和压力相同的工况下,烟气的总发射率随着温度的上升而减小,说明温度的升高减弱了烟气的辐射特性。对于4种不同的工况,温度从1000 K升高到2500 K时烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为0.273 6、0.270 5、0.251 5和0.250 5。这种变化的原因在于随着温度升高,分子的能量增加,谱线宽度扩大,使得谱线强度分散在更广的波数范围内,从而导致烟气的总发射率降低。由图3(e)可以看出,在相同的温度变化范围内,对于行程长度较小的情况,随着摩尔比的增加,烟气的总发射率差值增大,即摩尔比越大,温度升高对烟

气的总发射率的影响越大;对于行程长度较大的情况,随着摩尔比的增加,烟气的总发射率差值减小,即摩尔比越大,温度升高对烟气的总发射率的影响越小,这与KANGWANPONGPAN等^[26]在常压下得到的变化趋势较吻合,不同的是,常压下这种结果不如低压下明显。由图3(f)可以看出,随着压力降低,相同温度变化范围内烟气的总发射率差值 $\Delta\epsilon'$ ($\Delta\epsilon' = \epsilon'_1 - \epsilon'_2$, ϵ'_1 、 ϵ'_2 分别为1000、2500 K时的总发射率)减小,即温度升高对烟气总发射率的影响作用减弱。综上,对于空气燃烧气氛,随着温度的升高,烟气的辐射特性减弱;摩尔比越大,在行程长度较小的情况下,这种减弱的

作用更显著,但在行程长度较大的情况下,这种减弱的作用不明显;压力降低,这种减弱的作用受抑制。

2.4 摩尔比对烟气辐射特性的影响

图 4 为 $T=1\ 000、2\ 000\ K, P=0.101\ 325$ 和 $0.061\ 655\ MPa$ 的条件下,水蒸气和二氧化碳的摩尔比 M 的变化对烟气的总发射率的影响。从图 4(a)~(d) 可以看出,对于温度和压力相同的工况,烟气的总发射率随着摩尔比的增加而增大,表明摩尔比的增加增强了烟气的辐射特性。4 种不同工况下摩尔比从 1 增至 2 时,烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 $0.088\ 1、0.100\ 4、0.088\ 9$ 和 $0.100\ 6$ 。这种变化的原因

在于一方面较大的摩尔比说明烟气中存在更多的 H_2O 分子,这通常导致更高的烟气总发射率,另一方面 H_2O 和 CO_2 分子处在不同的辐射区域,摩尔比的增大可能增强特定波长范围内的辐射,导致烟气的总发射率上升。由图 4(e)、(f) 可以看出,在相同摩尔比的变化范围内,小行程长度下烟气的总发射率差值 $\Delta\epsilon''$ ($\Delta\epsilon'' = \epsilon''_2 - \epsilon''_1$, $\epsilon''_1、\epsilon''_2$ 分别为 $M=1、2$ 时的总发射率) 随着温度的升高或压力的下降而减小,即温度或压力的变化对烟气总发射率的影响减小;相反,大行程长度下,烟气的总发射率差值随温度的升高或压力的下降而增大,即温度或压力的变化对烟气总发射率的影响

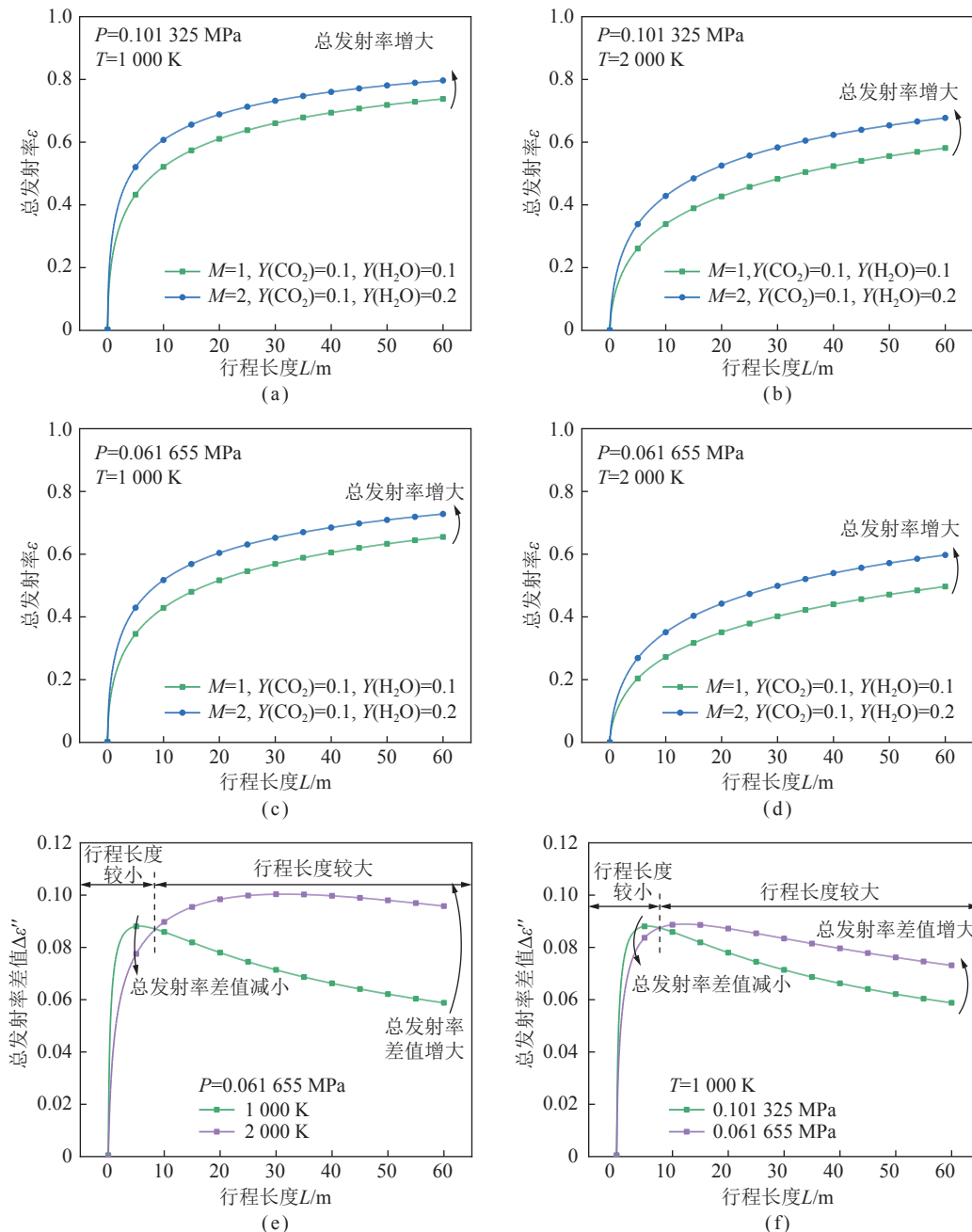


图 4 摩尔比对总发射率的影响

Fig.4 Influence of molar fraction ratio on total emissivity

影响增大。这与文献[23,26]中在常压和增压下的结果类似。综上,对于空气燃烧气氛,摩尔比的增加能够增强烟气的辐射特性;在行程长度较小的情况下,这种增强的趋势会受到低压或高温的抑制,而在行程长度较大的情况下,这种增强的趋势则更加显著。

2.5 灰气体加权和模型修正结果及分析

基于 HITEMP2010 光谱数据库,采用 LBL 法计算不同工况下烟气的总发射率,将其与改进的 WSGG 模型关联式分析拟合,确定 c_{ij} 、 d_{ij} , 开发出 4 灰体、6 次温度多项式的 WSGG 模型,模型参数见表 1。

表 1 低气压条件下不同摩尔比的 WSGG 模型参数

Table 1 WSGG model parameters in sub-atmospheric pressure at various molar ratios

$P=0.101\ 325\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$c_{i,1}$	$c_{i,2}$	$c_{i,3}$	$c_{i,4}$	$c_{i,5}$	$c_{i,6}$
1	-1.467 2	6.272 1	-8.452 5	5.504 7	-1.718 1	0.205 6
2	1.319 3	-5.003 4	8.651 2	-6.921 0	2.556 1	-0.354 3
3	0.029 8	1.374 7	-3.029 0	2.790 5	-1.169 7	0.180 8
4	0.333 6	-0.341 1	0.219 7	-0.183 3	0.096 8	-0.017 9
$P=0.101\ 325\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	$d_{i,3}$	$d_{i,4}$	$d_{i,5}$	$d_{i,6}$
1	-0.042 6	0.663 3	-1.398 4	1.261 9	-0.494 4	0.070 2
2	0.451 7	-3.200 0	9.736 9	-10.390 4	4.716 2	-0.765 0
3	3.004 2	-11.571 6	30.561 5	-28.502 1	11.306 3	-1.639 8
4	37.988 8	-76.696 1	99.068 4	5.214 6	-40.787 5	10.910 5
$P=0.076\ 622\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$c_{i,1}$	$c_{i,2}$	$c_{i,3}$	$c_{i,4}$	$c_{i,5}$	$c_{i,6}$
1	-0.076 9	0.109 6	0.801 9	-1.000 9	0.422 5	-0.060 9
2	-0.140 8	2.321 4	-4.329 6	3.723 9	-1.457 0	0.211 1
3	0.067 2	1.006 2	-2.276 8	2.025 5	-0.795 0	0.113 7
4	0.371 6	-0.779 4	1.032 1	-0.774 1	0.285 7	-0.040 3
$P=0.076\ 622\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	$d_{i,3}$	$d_{i,4}$	$d_{i,5}$	$d_{i,6}$
1	-1.314 9	6.580 1	-7.666 0	3.890 7	-0.917 1	0.084 7
2	0.206 5	-0.027 3	-0.138 5	0.053 3	0.014 6	-0.006 5
3	1.439 4	-2.554 3	13.473 0	-13.789 8	5.047 2	-0.590 3
4	13.154 0	28.898 1	-5.063 2	-18.230 0	13.181 5	-2.902 3
$P=0.061\ 655\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$c_{i,1}$	$c_{i,2}$	$c_{i,3}$	$c_{i,4}$	$c_{i,5}$	$c_{i,6}$
1	-0.108 5	0.296 6	0.691 2	-1.133 1	0.540 4	-0.084 9
2	-0.036 7	1.726 3	-2.938 2	2.359 0	-0.885 0	0.124 8
3	0.217 9	-0.403 9	0.354 6	-0.187 1	0.055 1	-0.006 6
4	0.191 6	0.292 5	-0.845 4	0.696 9	-0.253 1	0.034 9
$P=0.061\ 655\ \text{MPa}, Y(\text{H}_2\text{O})=Y(\text{CO}_2)=0.1$						
摩尔比 i/j	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	$d_{i,3}$	$d_{i,4}$	$d_{i,5}$	$d_{i,6}$
1	-2.699 0	15.526 3	-26.106 8	21.157 3	-8.007 5	1.124 3
2	0.443 8	-0.977 5	1.111 4	-0.554 8	0.117 2	-0.008 1
3	-214.769 1	803.445 9	29.494 0	2 548.556 6	6 272.941 4	-2 715.212 3
4	3.575 6	-8.028 8	16.711 5	0.017 3	-5.549 0	1.328 3

续表

P=0.101 325 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>c_{i,1}</i>	<i>c_{i,2}</i>	<i>c_{i,3}</i>	<i>c_{i,4}</i>	<i>c_{i,5}</i>	<i>c_{i,6}</i>
1	0.679 9	-2.122 6	2.808 4	-1.872 2	0.613 8	-0.078 1
2	-0.206 1	2.525 0	-4.595 4	3.864 9	-1.483 6	0.210 5
3	-0.510 4	2.769 2	-3.941 3	2.751 1	-0.933 9	0.120 4
4	0.239 5	0.165 7	-0.477 2	0.414 6	-0.173 0	0.028 4
P=0.101 325 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>d_{i,1}</i>	<i>d_{i,2}</i>	<i>d_{i,3}</i>	<i>d_{i,4}</i>	<i>d_{i,5}</i>	<i>d_{i,6}</i>
1	70.593 2	-304.489 7	-11.098 5	-1 280.681 0	12 897.600 4	-3 343.644 8
2	0.147 8	-0.319 1	1.033 5	-1.172 2	0.530 0	-0.083 3
3	-2.376 3	13.290 9	-18.280 4	11.471 5	-3.454 8	0.403 1
4	-3.067 2	16.193 1	6.437 7	-17.784 1	7.582 0	-0.974 9
P=0.076 622 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>c_{i,1}</i>	<i>c_{i,2}</i>	<i>c_{i,3}</i>	<i>c_{i,4}</i>	<i>c_{i,5}</i>	<i>c_{i,6}</i>
1	-0.039 7	1.647 0	-2.688 6	2.109 2	-0.766 9	0.103 4
2	2.935 1	-16.538 3	22.852 6	0.069 4	20.163 4	-56.707 9
3	-2.572 5	15.853 8	-22.103 4	-0.551 5	-20.002 6	56.686 7
4	0.157 6	0.587 5	-0.723 5	0.367 6	-0.095 6	0.010 3
P=0.076 622 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>d_{i,1}</i>	<i>d_{i,2}</i>	<i>d_{i,3}</i>	<i>d_{i,4}</i>	<i>d_{i,5}</i>	<i>d_{i,6}</i>
1	0.074 3	0.119 3	0.155 8	-0.324 3	0.159 9	-0.024 8
2	-20 084.255 1	40 889.317 4	153 580.116 4	31 924.713 5	-123 519.218 5	281 067.182 0
3	-90.877 2	-209.736 6	549.251 7	-2 934.964 3	58 079.991 5	-21 903.037 2
4	0.154 7	6.392 1	-8.178 7	4.753 2	-1.426 9	0.179 0
P=0.061 655 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>c_{i,1}</i>	<i>c_{i,2}</i>	<i>c_{i,3}</i>	<i>c_{i,4}</i>	<i>c_{i,5}</i>	<i>c_{i,6}</i>
1	-3.766 8	17.762 7	-30.378 3	23.925 0	-8.779 0	1.213 1
2	-7.723 8	20.997 2	-22.400 4	12.292 9	-3.425 3	0.382 2
3	3.880 2	-17.619 1	31.451 0	-25.741 9	9.701 4	-1.364 5
4	0.377 0	-0.519 4	1.298 8	-0.951 3	0.217 1	-0.008 3
P=0.061 655 MPa, Y(H ₂ O)=Y(CO ₂)= 0.2						
摩尔比 <i>ij</i>	<i>d_{i,1}</i>	<i>d_{i,2}</i>	<i>d_{i,3}</i>	<i>d_{i,4}</i>	<i>d_{i,5}</i>	<i>d_{i,6}</i>
1	77.360 2	-97.917 8	133.865 5	-163.668 4	-846.442 2	1 276.610 7
2	-0.005 8	0.032 9	-0.113 5	0.130 8	-0.055 0	0.009 6
3	127.039 0	-332.614 2	-79.600 2	902.964 7	-835.584 8	228.632 0
4	3.465 9	-13.606 9	22.762 8	-18.965 9	7.794 7	-1.234 9

改进的 WSGG 模型与 LBL 法和 SMITH^[14]的 WSGG 模型计算结果的对比如图 5 所示。图 5 给出了水蒸气和二氧化碳的摩尔比 $M=1, 2, T=1\ 500\ K, P=0.101\ 325, 0.076\ 622$ 和 $0.061\ 655\ MPa$ 下烟气的总发射率随行程长度的变化。图 5 中不同工况下改进后的 WSGG 模型和 LBL 法的计算结果非常吻合,其

决定系数 R -square 分别为 0.999 6、0.999 5、0.999 7、0.999 2、0.999 3 和 0.998 9, 烟气总发射率的最大相对误差为 3.67%。而 Smith 的 WSGG 模型在常压条件和外推到低压条件与 LBL 计算结果相比均存在一定程度的误差。当行程长度小于 10 m 时, 图 5(a)~(f) 中不同工况下烟气总发射率的最大相对误差分别达

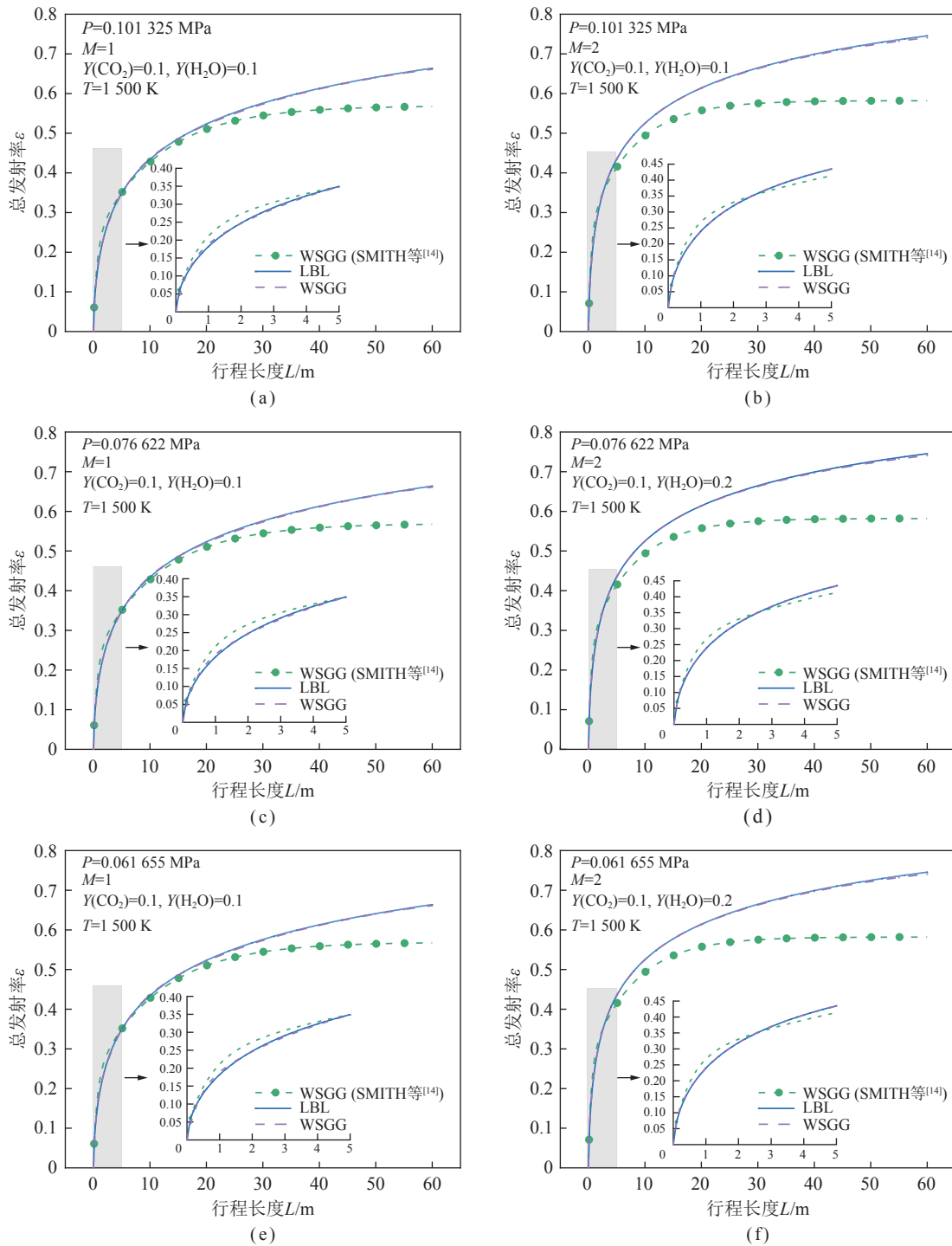


图 5 LBL 法和不同 WSGG 模型的对比

Fig.5 Comparison among LBL method and different WSGG models

16.11%、20.99%、19.28%、17.53%、21.93% 和 19.83%。当行程长度大于 10 m 时,绝对误差扩大,图 5 的不同工况下烟气总发射率的最大绝对误差分别达 0.096、0.164、0.055、0.123、0.041 和 0.091。Smith 采用指数宽谱带模型作为基准,其精度低于 LBL 法,除此之外,Smith 的 WSGG 模型参数拟合数据的范围是压力 0.1 MPa,行程长度 0~10 m,拟合范围内的计算结果尚有偏差,拟合范围外的计算结果更难以保证准确性,这

些都是产生误差的原因。因此,相比 Smith 的 WSGG 模型外推,改进后的 WSGG 模型更适用于低气压空气燃烧气氛。

3 结 论

(1) 与常压环境相比,低压环境下烟气的总发射率降低,烟气的辐射特性减弱,4 种工况下烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.093 4、0.084 5、

0.091 1 和 0.084 3。在小行程长度下, 摩尔比越大, 这种减弱的现象越明显, 大行程长度下相反。温度越高, 这种减弱的现象越不明显。

(2) 随着温度的升高, 烟气的总发射率减小, 烟气的辐射特性减弱, 4 种工况下烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.273 6、0.270 5、0.251 5 和 0.250 5。摩尔比越大, 在行程长度较小的情况下这种减弱的现象越明显, 而行程长度较大的情况下则反之。相比常压环境, 低压环境下这种减弱的现象受抑制。

(3) 随着摩尔比的增加, 烟气的总发射率增大, 烟气的辐射特性增强, 4 种工况下烟气总发射率随行程长度变化的最大差值分别为 0.088 1、0.100 4、0.088 9 和 0.100 6。温度越高或压力越低, 在行程长度较小的情况下这种增强的趋势受到抑制, 在行程长度较大的情况下则相反。

(4) 传统的 WSGG 模型是由 Smith 基于指数宽谱带模型为基准所建立的, 其外推应用到低气压, 路程长度大于 10 m 的工况下存在较大误差。不同工况下烟气总发射率的最大相对误差为 21.93%, 最大绝对误差为 0.164。而改进后的 WSGG 模型在不同工况下的烟气总发射率的最大相对误差为 3.67%。相比 Smith 的 WSGG 模型, 改进后的 WSGG 模型计算的结果与 LBL 法计算的结果非常吻合, 更适于低气压空气燃烧条件。

参考文献(References):

- [1] 杜勇博, 笮耀东, 刘学敏, 等. 高原锅炉运行性能及设计方法的研究进展[J]. 工业锅炉, 2020(6): 1-7.
DU Yongbo, DA Yaodong, LIU Xuemin, et al. The research progress on operation performance and design of plateau boiler[J]. Industrial Boilers, 2020(6): 1-7.
- [2] 杜勇博, 张井坤, 笮耀东, 等. 高原锅炉燃料燃烧和烟气特性的研究与进展[J]. 工业锅炉, 2020(6): 1-6.
DU Yongbo, ZHANG Jingkun, DA Yaodong, et al. The research and development of plateau boiler fuel combustion and flue gas characteristics[J]. Industrial Boilers, 2020(6): 1-6.
- [3] ZHANG J, DU Y, YU J, et al. The influence of altitude on combustion characteristics within gas-fired boiler by numerical simulation[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2023, 568: e2880.
- [4] BLOKH A G. Heat transfer in steam boiler furnaces[J]. Hemisphere Publishing New York Ny, 1987, 378: 28-39.
- [5] MODEST M F, MAZUMDER S. Radiative heat transfer[M]. New York: Academic Press, 2021.
- [6] ARNOLD J, WHITING E, LYLE G. 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.
- [7] TAINE J. A line-by-line calculation of low-resolution radiative properties of CO₂-CO-transparent nonisothermal gases mixtures up to 3 000 K[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1983, 30(4): 371-379.
- [8] GOODY R. A statistical model for water - vapour absorption[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1952, 78: 165-169.
- [9] MALKMUS W. Random Lorentz band model with exponential-tailed S-1 line-intensity distribution function[J]. JOSA, 1967, 57(3): 323-329.
- [10] LIU F, SMALLWOOD G, GULDER O. Radiation heat transfer calculations using the SNBCK method[C]//Proceedings of the 33rd Thermophysics Conference, F. 1999.
- [11] EDWARDS D, BALAKRISHNAN A. Thermal radiation by combustion gases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16(1): 25-40.
- [12] MARIN O, BUCKIUS R. Wide band correlated-*k* approach to thermal radiative transport in nonhomogeneous media[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119: 892-903.
- [13] 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.
- [14] SMITH T F, SHEN Z F, FRIEDMAN J N. Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model[J]. Transactions of the ASME, 1982, 104: 602-608.
- [15] DENISON M K, WEBB B W. A spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE solvers[J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115: 1002-1012.
- [16] LEWIS E E, MILLER W F. Computational methods of neutron transport[M]. New York: Wiley-Interscience, 1984.
- [17] HOWELL J R, MENGUC M P, SIEGEL R. Thermal radiation heat transfer[M]. Calabasas: CRC Press, 2010.
- [18] BECHER V, CLAUSEN S, FATEEV A, et al. Validation of spectral gas radiation models under oxyfuel conditions. Part A: Gas cell experiments[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5: S76-S99.
- [19] CHU H, LIU F, ZHOU H. 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(21-22): 4736-4745.
- [20] CHU H, LIU F, ZHOU H. Calculations of gas radiation heat transfer in a two-dimensional rectangular enclosure using the line-by-line approach and the statistical narrow-band correlated-*k* model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 59: 66-74.
- [21] 李皓宇, 阎维平. 富氧燃烧含灰烟气辐射特性的部分光谱 *k* 模型[J]. 化工学报, 2011, 62(11): 3073-3080.
LI Haoyu, YAN Weiping. Partial spectrum *k*-distribution model for radiative property of flue gas with soot and flyash from oxygen-enriched combustion[J]. CIESC Journal, 2011, 62(11): 3073-3080.
- [22] 尹雪梅, 刘林华, 李炳熙. 气体与粒子混合物辐射特性宽带 *k* 分布模型[J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1354-1359.
YIN Xuemei, LIU Linhua, LI Bingxi. Wide band *k* distribution model for radiative properties of gas and particle mixtures[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(6): 1354-1359.

- al of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(6): 1354–1359.
- [23] BAHADOR M, SUNDEN B. Evaluation of weighted sum of grey gases coefficients for combustion gases using predicted emissivities from high resolution spectroscopic databases[C]// Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, F. 2008.
- [24] YIN C, JOHANSEN L C, ROSENDAHL L A, et al. New weighted sum of gray gases model applicable to computational fluid dynamics (CFD) modeling of oxy-fuel combustion: Derivation, validation, and implementation[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(12): 6275–6282.
- [25] JOHANSSON R, BO L, ANDERSSON K, et al. Account for variations in the H₂O to CO₂ molar ratio when modelling gaseous radiative heat transfer with the weighted-sum-of-grey-gases model[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(5): 893–901.
- [26] KANGWANPONGPAN T, FRANÇA F H, DA SILVA R C, et al. New correlations for the weighted-sum-of-gray-gases model in oxy-fuel conditions based on HITEMP 2010 database[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(25–26): 7419–7433.
- [27] DORIGON L J, DUCIAK G, BRITTES R, 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.
- [28] BORDBAR M H, WEĆEL G, HYPÄNEN T. A line by line based weighted sum of gray gases model for inhomogeneous CO₂-H₂O mixture in oxy-fired combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2435–2445.
- [29] BORDBAR H, COELHO F R, FRAGA G C, et al. Pressure-dependent weighted-sum-of-gray-gases models for heterogeneous CO₂-H₂O mixtures at sub-and super-atmospheric pressure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 173: 121207.
- [30] 楚化强, 冯艳, 曹文健, 等. 灰气体加权和辐射模型综合评估及分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(9): 212–221.
CHU Huaqiang, FENG Yan, CAO Wenjian, et al. Comprehensive evaluation and analysis of the weighted-sum-of-gray-gases radiation model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(9): 212–221.
- [31] 尹雪梅, 王磊, 刘永涛, 等. 适于混合气体基于 k 分布的灰气体加权和模型[J]. *化工学报*, 2021, 72(6): 3296–3305.
YIN Xuemei, WANG Lei, LIU Yongtao, et al. Weighted-sum-of-gray-gases model based on k -distribution for gas mixture[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2021, 72(6): 3296–3305.
- [32] 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.
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.
- [33] 高大明, 陈鸿伟, 杨建蒙, 等. 干湿两种烟气再循环方式下富氧燃烧循环流化床锅炉烟气辐射特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 1086–1097.
GAO Daming, CHEN Hongwei, YANG Jianmeng, et al. Radiation characteristics analysis of flue gas in oxy-fuel combustion circulating fluidized bed boiler under dry or wet flue gas recirculation model[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2019, 39(4): 1086–1097.
- [34] GUO J, SHEN L, HE X, et al. Assessment of weighted-sum-of-gray-gases models for gas-soot mixture in jet diffusion flames[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 181: 121907.
- [35] BORDBAR H, FRAGA G C, HOSTIKKA S. An extended weighted-sum-of-gray-gases model to account for all CO₂-H₂O molar fraction ratios in thermal radiation[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 110: 104400.
- [36] HE Z, DONG C, LIANG D, et al. A weighted-sum-of-gray soot-fractal-aggregates model for nongray heat radiation in the high temperature gas-soot mixture[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 260: 107431.
- [37] WANG C, DI H, LIN H, et al. Applications of weighted-sum-of-gray-gas model with soot to an experimental aero-engine combustion chamber[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121511.
- [38] CHU H, GU M, CONSALVI J-L, et al. Effects of total pressure on non-grey gas radiation transfer in oxy-fuel combustion using the LBL, SNB, SNBCK, WSGG, and FSCK methods[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 172: 24–35.
- [39] ROTHMAN L S, GORDON I, BARBER R, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(15): 2139–2150.
- [40] ROTHMAN L S, RINSLAND C, GOLDMAN A, et al. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(5): 665–710.