文章编号:1673-5005(2009)05-0156-03

吸收系数对炉膛传热计算的影响

郭晓艳

(中国石油大学化学化工学院,山东东营 257061)

摘要:对炉膛内的辐射传热用蒙特卡罗方法进行模拟计算,对吸收系数为常数及吸收系数随温度、浓度变化情况下 的炉膛烟气温度分布与炉管热强度分布进行对比。结果表明,烟气的吸收系数对计算结果有较大的影响,当烟气的 吸收系数随温度、浓度变化时,计算所得的烟气温度分布、管壁热强度分布以及热负荷值与实际情况更加相符。 关键词:烟气吸收系数;蒙特卡罗方法;辐射传热;加热炉 中图分类号:TK 175 文献标识码:A

Effects of gas absorption coefficient on heat transfer calculation in furnace hearth

GUO Xiao-yan

(College of Chemistry and Chemical Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Using Monte-Carlo method to calculate the radiant heat transfer in the hearth of cylindrical furnace, the comparative calculation including gas temperature distribution of the hearth and calorific intensity of furnace tube was done, taking gas absorption coefficient as constant and as function of flue gas. The results show that the gas absorption coefficient has much effect on the calculation results. When the gas absorption coefficient varies with the temperature, concentration changing, the distribution of temperature and the tube surface calorific intensity and heat load value correspond to the facts.

Key words: gas absorption coefficient; Monte-Carlo method; radiant heat transfer; heat furnace

在炉膛内辐射传热的三维计算中,烟气的吸收 系数一般当作常数来处理^[1],然而吸收系数是与烟 气的组成、温度、压力、浓度等多种因素有关^[2]。笔 者研究采用蒙特卡罗方法计算炉膛辐射传热时,烟 气的吸收系数对炉膛中的温度分布、炉管外壁的热 强度分布的影响。

1 吸收系数

吸收系数又称气体辐射减弱系数或衰减系数, 它是由气体辐射和吸收是在整个容积中进行所引起 的。当气体或容器壁发射出辐射能时,可以射入到 气体容积内的任何地方,但辐射能在射线行程过程 中被有吸收能力的气体分子所部分吸收而逐渐削 弱。炉膛烟气中主要含有 CO₂ 和水蒸气,这 2 种气 体具有很强的辐射和吸收能力,所以在计算过程中 必须考虑^[3]。一般在锅炉传热计算中,用下式计算烟气的黑度^[45]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{s} = 1 - \exp(-k' p L).$$

式中, e_g 为烟气对整个包壁的黑度;k'为吸收系数, MPa⁻¹·m⁻¹;p为烟气的绝对压力, MPa;L为平均 射线行程, m。吸收系数 k'是与烟气温度,烟气压 力、烟气中三原子气体的浓度有关的函数,采用如下 经验式计算^[6]:

$$k' = \left(\frac{0.78 + 1.6r_{\rm H_2O}}{\sqrt{p_{\rm RO_2}L}} - 0.1\right) \left(1 - 0.37 \times \frac{T}{1000}\right) r_{\rm RO_2}.$$

式中, r_{H_20} 为烟气中水蒸气的容积分率; p_{R0_2} 为烟气 中三原子气体的分压, MPa;T为烟气温度, K; r_{R0_2} 为 烟气中三原子气体的容积分率。

收稿日期:2009-03-15

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重点科学研究与技术开发项目

作者简介:郭晓艳(1973-),女(汉族),山东惠民人,讲师,硕士,研究方向为化学工程。

2 蒙特卡罗方法求解过程

在计算过程中,吸收系数可以采用常数也可以 采用经验关联式。当吸收系数采用常数时,认为三 原子气体在炉膛中均匀分布;若采用经验关联式,则 要首先计算出三原子气体在炉膛中的浓度分布和压 力分布。浓度场和压力场的计算采用双方程模型模 拟湍流流动,辐射传热采用蒙特卡罗方法,采用有限 容积法对微分方程进行离散,用 SIMPLE 法进行编 程计算^[7]。

蒙特卡罗方法是用能束来模拟辐射传热中的发 射、反射、吸收等实际物理过程,能束从发射开始直 到最后被表面或气体吸收的全部历程是由一系列随 机数决定的,这些随机数决定能束的发射位置、在表 面区或气体区中的发射方向、行程长度以及该能束 是否为表面吸收或反射。

把炉膛体积划分网格,炉管属于表面区网格,烟 气被划分成许多气体网格,将每个从小网格发出的 能量看成由总数为 N 的若干份组成,每份称为一个 能束,其发射方向、在吸收气体中的行程长度及碰到 表面时是被吸收还是被反射都是随机的,但不是任 意的^[8]。

当能束最终被某一表面网格或气体网格吸收 时,其随机游动过程便告终止。然后对第二个能束 进行模拟,直到该网格内的能束都模拟完,便可用统 计的方法求出各吸收区所吸收的能束数目。由此便 可得到该网格对其他网格的辐射传热量。进一步可 用同样的方法求出所有网格对某一网格的辐射传热 量。

在稳定传热的情况下,对任一微元气体 dV_j,有 $4K_jE_{bj}dV_j = dV_j \int_V \frac{K_iK_jE_{bi}}{\pi S^2} \exp(-\int_0^S K_{ij}dS) dV_i +$ $dV_j \int_V \frac{w_iK_j\cos\varphi_i}{\pi S^2} \exp(-\int_0^S K_{ij}dS) dA_i) + Q_e dV_j.$ 其中, $dV_j \int_V \frac{K_iK_jE_{bi}}{\pi S^2} \exp(-\int_0^S K_{ij}dS) dV_i$ 指任一气体网格 对 *j* 网格气体的辐射传热量; $dV_j \int_V \frac{w_iK_j\cos\varphi_i}{\pi S^2} \exp(-\int_0^S K_{ij}dS) dA_i$ 指任—表面网格对*j* 网格气体的辐射传热 量; K_i 为微元气体 dV_i 的吸收系数, MPa⁻¹ · m⁻¹; E_{bi} 为 dV_i 的黑体辐射能力, W/m²; S 为气体与气体中心 连线的长度或气体和表面中心连线的长度,m; φ_i 为 dA_i 的法线与 S 的夹角, rad; Q_e 为微元气体在单位时 间、单位体积内燃料燃烧放出的热量, W/(m³・h); w 为有效辐射强度, kJ/(h・m²)。

先用蒙特卡罗方法计算出方程中的积分项,然 后用多重循环迭代求出辐射室内烟气的温度分布, 将这些积分项和温度值代入积分方程组中,进行松 弛迭代计算,直到满足给定的精度要求为止。

3 计算实例

选用某厂圆筒型常压炉作为实例进行计算, 结构数据如下:辐射室直径 3 542.8 mm,辐射室高 度 6416 mm,辐射管规格为 Φ 89 mm × 8 mm, Φ 114 mm × 8 mm,辐射管根数为 68 × 2 和 4 × 2,辐射管 长度 6 000 mm,辐射管中心距 150 mm,火嘴型式 WC²-100 型,数量为 3 个。工艺参数如下:介质流量 26.3 m³/h,燃料油用量 257.45 kg/h,燃料油温度 115 ℃,原料入炉压力 1.6 MPa,实际空气用量 6957.8 kg/h,排烟温度 279.9 ℃,对流室顶部温度 391 ℃,对流室下部温度 658 ℃,辐射室上部温度 625 ℃,辐射室下部温度 640 ℃,燃料油低热值 42 426.0 kJ/kg,表面热强度 49 276.8 kJ/(m².h),有效热负荷 7.25 × 10⁶ kJ/h。

由于计算机计算速度和存储量的限制,将计算 区域沿半径方向分为8个区,轴向分为10个区,圆 周方向分为34个区。

气体吸收系数沿径向方向的变化规律如图1所示。从图中可以看出,吸收系数在炉膛中心处最小,随着向壁面的不断靠近,吸收系数不断增大,到达离壁面约3/4距离处达到最大,随后又降低。



气体吸收系数沿轴向的变化规律如图 2 所示。 在炉膛高度的约 2/3 处,吸收系数的变化率达到最 大,而在此之前,随炉膛高度的增加,吸收系数略有 增大。

分别对吸收系数为常数和变数时的烟气温度分

布、热强度分布等做了计算。2种情况下的烟气温 度分布见表1。从表中数据可看出,在炉膛轴心处 温度最高,近1000 ℃,越靠近炉墙,温度越低,在靠 近炉管区,温度500 ℃左右。当气体吸收系数取变 数的时候接近炉膛温度的实际值,而气体吸收系数 取常数时与实测值相差100 ℃左右。



图 2 吸收系数沿轴向的变化规律



axial direction

表1 烟气温度分布比较

Table 1 Comparison of gas temperature distribution Υ

沿轴向 小区数	吸收系数取常数计算值			吸收系数取 变数计算值			实测值
	沿径 向第 1 区	沿径 向第 4 区	沿径 向第 7 区	沿径 向第 1区	沿径 向第 4 区	沿径 向第 7 区	沿径向 第4区
第10	473.8	484.2	459.7	767.5	660.0	500.2	658.0
第9	974. 8	730.6	508.7	989.4	633.4	495.3	631.0
第7	982. 2	714. 2	513. 1	990. I	630. 2	490. 2	625.0
第5	985.0	714.4	563.8	991.2	637.3	504.2	636. 0
第3	975.5	720. 2	521.8	984. 3	641.2	520. 1	640.0
第1	955.4	731.4	542.4	962.0	610. 2	510.4	612.0

2种情况下的热强度分布见图 3,图中的热强度



图3 管壁热强度比较

Fig. 3 Comparison of tube surface calorific intensity 值是取沿圆周方向的平均值。从图 3 中看出,当吸 收系数取常数时算出的热强度要比吸收系数取变数 时算出的值要大,而炉管表面的实际平均热强度为 49 276. 8 kJ/(m² · h),所以当吸收系数取变数时与 实际情况更接近。

当吸收系数取常数时热负荷的计算值为 9.01 ×10⁶ kJ/h,实际热负荷为 7.25 × 10⁶ kJ/h,误差达 到了 24.3%,而吸收系数取变数时热负荷的计算值 为 7.42 × 10⁶ kJ/h,与实际热负荷值接近,误差仅为 2.3%。

3 结 论

(1)炉膛中烟气吸收系数取常数时,温度分布 与实际温度分布相差 100 ℃左右,而当吸收系数取 为随烟气的温度、压力、浓度变化的函数时,温度分 布与实际情况相符。

(2) 炉膛中烟气吸收系数取常数时,管壁平均 热强度值与实测值误差较大,热负荷与实测值的误 差达到了24.3%,当吸收系数取变数时,管壁平均 热强度计算误差较小,热负荷误差只有2.3%。

参考文献:

- [1] 黄祖祺,杨光炯,于遵宏,等.管式加热炉的模拟与计 算[M].北京:化学工业出版社,1993:78-91.
- [2] 蔡晖, 余刚. 余热锅炉受热面辐射系数的影响因素
 [J]. 锅炉制造,2000,3:26-29.
 CAI Hui, YU Gang. Afective factors on radiation coefficient of waste—heat boiler radiant surface [J]. Boiler Manufacturing, 2000,3:26-29.
- [3] DEGIOVANNI Alain, REMY Benjamin, ANDRE Stephane. Transient radiation-conductive heat transfer problems: the quadrupole method[J]. Journal of Thermal Science, 2002, 11, (4):327-332.
- [4] KREININ E V. Modern gas radiation tubes with ceramic frame[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2003,45 (1/2):451-459.
- [5] VINAYAGAM K. Understand the secrets of fired heaters tuning[J]. Heater Transfer, 2006,24(12):56-66.
- [6] 钱家麟,于遵宏,王兰田,等.管式加热炉[M].北京:
 ½加工出版社,1987;123-127.
- BAKLASHOV K V, KHANIN Yu D, ANANEV V A.
 Experience in designing and manufacturing tube furnaces
 [J]. Chemistry and Tecnology of Fuels and Oils, 2002, 38(1):234-241.
- [8] 张腾飞,罗锐,冯文. 膛辐射传热数学模型及其仿真
 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):215-219.
 ZHANG Teng-fei, LUO Rui, FENG Wen. A model and simulation for radiative heat transfer in a boiler furnace
 [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(10):215-219.

(编辑 刘为清)