

循环灰为热载体的移动床煤热解室数学模型

刘清辉, 吕子安, 李定凯

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要:以循环灰为热载体的移动床煤热解室, 是煤气—蒸汽联产系统中的关键设备。基于煤的干燥与热解子模型、非烧结多孔介质内流动与传热理论、以及固体间接触导热等理论, 结合“限制粒径”判据, 建立了移动床煤热解室内煤热解过程的综合数学模型, 并利用模型对龙口褐煤的热解过程进行了仿真计算, 得到了满意的结果。

关键词:煤; 热解; 移动床; 数学模型

中图分类号: TK11.2 文献标识码: A

1 引言

发展循环流化床煤气—蒸汽联产工艺以实现城镇煤气化是一条适合我国国情的现实途径。该工艺中涉及一系列复杂的物理化学过程, 通过建立其数学模型, 可以获得对这些过程机理的透彻了解, 并可以进一步实现联产系统的优化设计和运行。以循环灰为热载体的移动床煤热解室, 是煤气—蒸汽联产系统中的关键设备之一, 开发其数学模型, 是联产系统数学模型研究的重要组成部分。本文以其为对象, 利用相关理论和煤质分析、筛分分析数据, 建立了煤热解过程的综合模型, 并应用该模型对龙口褐煤的热解过程进行了仿真计算。

2 煤热解过程数学模型

2.1 总体过程描述与建模假设

热解室的基本工作过程是(参见图 1): 给煤设备将热解用煤由热解室上部送入热解室, 在这一过程中, 热解用煤与从分离器分离下来的高温循环灰混合、形成混合物。在混合过程以及混合物在热解室内下移动的过程中, 煤被不断加热, 部分水蒸气首

先被释放出来; 然后, 煤粒经过进一步干燥、升温而发生热解反应, 产生煤气。煤气从热解室上部流出, 煤热解后形成的半焦和灰的混合物从热解室底部排出并被输送到循环流化床燃烧室内进行燃烧。

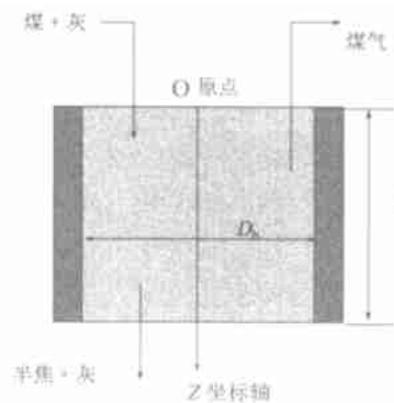


图 1 移动床热解室简图

热解室内煤与循环灰的混合图象是: 颗粒尺寸相对较大的煤粒稀疏地散布于颗粒尺寸相对细小的循环灰中。这一简化的物理模型是建立煤与循环灰之间传热模型的关键, 也是整个煤热解过程综合模型的基础, 此外包含的假设条件为: (1) 由单个煤颗粒的特性可以预报煤颗粒群的行为; (2) 热解室内综合过程受关键控制步骤支配, 获得对过程的描述不需要对所有细节进行全面的描述; (3) 热解室处于稳定状态运行, 室内空间各点上的物理参数不随时间变化; (4) 煤与循环灰混合均匀; (5) 煤与循环灰的混合物在热解室中匀速下移; (6) 灰呈惰性, 只参与换热, 不参与化学反应; (7) 以 Robert Wutti 提出的限制粒径作为煤粒均温假定是否成立的判据和区分大小煤粒的基准^[1]; 小于等于该粒径的小粒径煤粒在热解过程中温度分布均匀。

此外包含的假设条件为: (1) 由单个煤颗粒的特性可以预报煤颗粒群的行为; (2) 热解室内综合过程受关键控制步骤支配, 获得对过程的描述不需要对所有细节进行全面的描述; (3) 热解室处于稳定状态运行, 室内空间各点上的物理参数不随时间变化; (4) 煤与循环灰混合均匀; (5) 煤与循环灰的混合物在热解室中匀速下移; (6) 灰呈惰性, 只参与换热, 不参与化学反应; (7) 以 Robert Wutti 提出的限制粒径作为煤粒均温假定是否成立的判据和区分大小煤粒的基准^[1]; 小于等于该粒径的小粒径煤粒在热解过程中温度分布均匀。

2.2 煤的热解模型

煤的热解模型采用 Merrick 模型^[2], 即根据元素

收稿日期: 2001-08-31; 修订日期: 2001-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59766036)

作者简介: 刘清辉(1974-), 男, 河北南宫人, 清华大学硕士研究生。

平衡和质量平衡建立煤热解生成物的最终产量的计算方程,采用分布活化能的一阶反应系统动力学模型描述挥发份各组分和水分的释放过程。

煤热解生成物包括挥发份、水分和半焦。模型中考虑 8 种挥发份组分: CH₄、C₂H₆、CO、Tar、H₂、NH₃ 和 H₂S; 并假定实际挥发份组分中不同于 C₂H₆ 的烃类当作 C₂H₆ 等价体处理,焦油有固定的元素组成。煤热解生成物的最终产量的预报建立在 10 个线性方程的基础上,焦炭、水分和 8 种挥发份组分的最终产量是待求的未知数。

$$\sum_{j=0}^9 A_{ij} \bar{m}_j = b_i, \quad i = 1, \dots, 10 \quad (1)$$

其中 A_{ij} 和 b_i 分别为 Merrick 煤热解子模型常数矩阵及模型线性方程的右侧向量, m_j 为 j 组分占煤的可燃基质量份额。

每一种挥发份的系统动力学描述为: $d \delta / dt = k_r(1 - \delta)$ 。其中 δ 为某组分在 t 时间内的释放量占组分最终释放量的份额,反应速率参数 $k_r [S^{-1}]$ 遵循 Arrhenius 公式,是活化能和温度的函数。活化能服从 Rosin-Rammler 函数分布规律,函数参数的确定取决于煤种。本文选用的 Merrick 模型的各个参数是利用已有煤的热解和气化试验数据并采用 DSFD 优化算法对之作重新识别后得出的^[3~4]。

假设小粒径煤粒瞬时升温至 100 °C 完成干燥过程,随后发生热解。对于大粒径煤粒,假设水分均匀地分布在煤相中,从煤粒中释放出来的水蒸气和挥发份之间没有化学反应发生。大粒径煤粒进入被灰包裹的热环境,发生以下过程:基于蒸汽相在煤粒中较高的穿透率,假设传质过程迅速完成,煤粒内形成一个干湿界面;随着煤粒中水分的不断蒸发,该界面逐渐向煤粒核心移动;不考虑伴随水分蒸发的煤粒收缩,则界面外的干壳不断增厚,干壳在升温的同时发生热解;干燥结束后,整个煤粒进入热解阶段。煤热解反应引起的热汇采用 Merrick 热解热效应计算模型进行求解^[3]。

2.3 热解室内的传热模型

热解室底层煤粒热解释放的煤气温度比上层的高,而上层的灰温比下层的高,煤气从热解室底层向上流动的过程中不断有温度相对较低的煤气加入,同时又受到煤灰混合物对流加热作用。由于煤粒表面受灰的加热而迅速升温,在计算煤气与固体物料之间的传热量时,将煤粒和循环灰作为一个整体处理。根据 Gupta 和 Thodos 的多孔介质内对流换热关联式,单位体积的煤灰颗粒混合物内煤气与该混合

物间的对流换热量为:

$$q_{cnv} = h_{ag} \pi d^2 \eta (T_a - T_g) \quad (2)$$

式中, h_{ag} 为对流换热系数; η 为颗粒的数量密度; d 为灰煤颗粒的 Sauter 平均粒径; ϵ 为灰煤混合物的孔隙度。

煤颗粒被灰包裹,两者之间的传热过程设想为灰的堆积体通过与煤粒表面的接触导热将热量传递给煤粒,为此要求出两者间的等效导热系数(或接触热阻)。接触热阻模型的计算思路是^[6]:结合接触面的表面特性和负荷大小,建立灰与煤之间的变形模型,得到接触面的几何形态,在此基础上并结合煤与灰的热物理参数建立接触热阻的模型。

2.4 单一过程模型的综合

在如图 1 所示的坐标系中取垂直于坐标轴方向,厚度为 Δz 的热解室体积微元为控制体,则煤气质量平衡方程为:

$$GA + \frac{d(GA)}{dz} \Delta z + S_g A \Delta z = GA \quad (3)$$

式中, $S_g = \sum_{I_c} Num(I_c) \frac{dM}{dt} \Big|_{I_c}$, 为控制体内由于煤热解而产生的煤气质量源项, G 为煤气质量流率 (G_j 为煤气各组分的质量流率), A 为热解室横截面面积, $Num(I_c)$ 是单位体积煤 / 灰混合物中粒径为 $D(I_c) [m]$ 的第 I_c 号煤粒的个数。

煤气能量平衡方程为:

$$GAC_{pf} T_g + \frac{d(GAC_{pf} T_g)}{dz} \Delta z + E_g A \Delta z + q_{cnv} A \Delta z = GAC_{pf} T_g \quad (4)$$

式中: $E_g = \sum_{I_c} Num(I_c) C_{pf} \frac{dM}{dt} \Big|_{I_c} T_{surf}$, 为控制体内由于煤热解而产生的煤气能量源项。假设热解过程中小粒径煤粒外的灰层温度均匀,从煤粒表面释放的挥发份其温度等于煤粒表面温度,粒径为 $D(I_c)$ 的煤粒被厚为 $\Delta(I_c)$ 的灰层加热,认为灰层外表面是不随时间的推移而移动的绝热面。式(4)可化简为:

$$\frac{d(GC_{pf} T_g)}{dz} = -(E_g + q_{cnv}) \quad (5)$$

定义沿热解室轴向任一控制体内灰的平均温度为 $T_{av} (^\circ C)$, 以 T_{av} 沿热解室轴向的分布作为热解室内的灰温分布。以 T_{av} 代替 T_a , 以 T_g 代替 T_{surf} , 将 q_{cnv} 和 E_g 的表达式代入式(5)的离散化方程后可得控制体所产煤气的温度 T_g 。由于 $T_a(T_{av})$ 、 T_g 、 G_j 和 T 之间存在耦合关系,模型的求解必须采用迭代的方法完成。

3 模型计算结果及分析

以某锅炉厂煤气伴生工艺热态试验装置为对象, 利用上述数学模型对龙口褐煤的热解情况进行了仿真计算与分析, 并对试验与计算结果进行了比较。该装置参数、煤种的煤质分析和筛分分析数据以及给煤与给灰的参数分别见表 1 ~ 表 4, 试验与计算的比较结果见表 5。定义给灰比 $\beta = M_a/M_c$, 为给灰流率与给煤流率的比值。

龙口褐煤的计算结果图中, 质量流率分布图反映的是煤灰混合物到达热解室底部时, 给煤热解生成产物在热解室高度方向各截面上的积分效果。质量流率曲线上各截面的斜率的绝对值反映了给煤在该截面的热解反应速率。

煤灰混合物进入热解室后, 煤粒表面的温度迅速升高, 并接近于循环灰的温度。煤粒热解时, 认为热解生成气体离开煤粒表面时的温度等于煤粒表面温度^[1]。由图 2, 随着混合物的下移和煤热解吸热的进行, 循环灰的温度逐渐降低, 循环灰与煤气间的温差先是逐渐增大然后又逐渐减小。

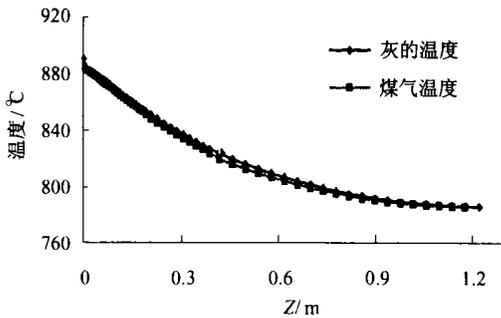


图 2 热解室内温度分布

大粒径煤粒所占比例大(粒径大于 3 mm 的煤粒占全样的 69.71%) 是龙口褐煤给煤筛分的特点之一, 这影响了灰煤间的传热, 使煤粒的升温缓慢, 煤粒的高温段集中于热解室的中下部。据 Arrhenius 定律, 煤的各热解组分的反应、释放速度与煤粒温度正相关, 伴随混合物下移, 煤粒的升温使煤在热解室中下部, 热解速率增加, 但由于可供热解成分的减少, 各截面的质量流率则不断降低。由质量流率分布图可以看出, 不论是煤气总体, 还是其中任一组分, 在热解速率上, 几乎都存在着上部的低速热解区与下部的高速热解区。

表 1 移动床热解室的参数

室壁材料名称	厚度/m	导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
内衬耐火砖	0.055	1.07
中层 1Cr18Ni8Ti 钢筒	0.01	16.3
石棉灰泥保温外层	0.125	0.093

(内径 $D_b = 0.3$ m, 高度 $H_b = 1.25$ m)

表 2 龙口褐煤的给煤煤质分析 (%)

	基 准	龙口褐煤
全水分	收到基	14.10
内在水分	空气干燥基	2.98
灰分	空气干燥基	16.11
挥发份	空气干燥基	36.20
碳元素	空气干燥基	55.30
氢元素	空气干燥基	5.93
氧元素	空气干燥基	17.85
氮元素	空气干燥基	1.34
硫元素	空气干燥基	0.49

表 3 龙口褐煤的给煤筛分数据

粒级/mm	占总质量/%	粒级/mm	占总质量/%
8 ~ 7	1.94	1.5 ~ 0.9	5.48
7 ~ 6	5.71	0.9 ~ 0.45	6.32
6 ~ 3.8	48.72	0.45 ~ 0.2	3.38
3.8 ~ 3	13.34	0.2 ~ 0.105	1.94
3 ~ 2	6.46	0.105 ~ 0.076	0.96
2 ~ 1.5	5.67	< 0.076	0.09

表 4 给煤与给灰的参数

	流率/ $kg \cdot s^{-1}$	温度/ $^\circ C$
给煤	0.025	25
给灰	0.375	890

表 5 试验结果与模型计算结果的比较

	龙口褐煤		
	试验值	计算值	
给煤率/ $kg \cdot s^{-1}$	0.022 83		
给灰率/ $kg \cdot s^{-1}$	0.331 04		
给灰温度/ $^\circ C$	890		
下部料层温度/ $^\circ C$	760	773	
煤 气 成 分	CH ₄ /%	30.9	30.25
	H ₂ /%	34.2	36.56
	CO/%	10.5	9.35
	CO ₂ /%	18.7	18.21
	C ₂ H ₆ /%	5.7	5.63
煤气产率/ $m^3 \cdot t^{-1}$ (煤)	202.89	188.62	

煤气各组分热解完成的快慢依据相应组分质量流率在质量流率分布图 Z 轴方向上降为零的先后来衡量, 它取决于组分热解的难易程度。相比较而言,

在各热解产物中,热解 H₂O、焦油、C₂H₆ 和 CO₂ 的热解要易于 CO、NH₃、H₂S、CH₄ 和 H₂ 的热解(图 4 ~ 图

5)。Merrick 煤热解子模型的特点之一是组分释放过程取决于一级反应模型的活化能参数。图中所示各热解成分释放过程的不同起源于 Merrick 模型各组分参数的设定。因而获得模型对热解过程准确性描述的关键是:在热解试验的基础上,有效地确定 Merrick 模型的各个参数。

基于计算煤种非常高的氧含量(18.4%)和 Merrick 模型预报最终产量的线性方法,如图 6 所示,热解煤气中热解水的含量很高,氢气所占份额较低。

4 结论

基于煤的干燥与热解子模型、非烧结多孔介质内流动与传热理论、以及固体间接触导热等理论,结合“限制粒径”判据,建立了移动床煤热解室内煤热解过程的综合数学模型,并利用该模型对龙口褐煤的热解过程进行了仿真计算,结合与试验结果比较(见表 5),计算结果令人满意。

本文为研究移动床煤热解室中煤的热解规律提供了一种数学方法。在 Merrick 煤热解子模型中,与煤种相关的诸参数的确定,对煤热解过程描述的准确性起关键作用。针对研究煤种,并结合试验结果,重新确定上述参数,是有效应用本模型方法所必须做的前期工作。

模型参数对计算的影响程度以及控制煤热解过程的关键因素,通过对模型的灵敏度与趋向性作用进一步分析得到。相应结果作者将另外著文论述。

参考文献:

- [1] ROBERT WUTTL, JOSEF PETEK, GERNOT STAUDINGER. Transport limitations in pyrolysing coal particles[J]. **Fuel**, 1996, 75(7): 843-850.
- [2] DAVID MERRICK. Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 1. The evolution of volatile matter[J]. **Fuel**, 1983, 62(5): 534-539.
- [3] 徐秀清, 马润田, 李定凯. 循环流化床煤气蒸汽联产技术经济分析——中小城市及工业企业煤气化途径[J]. 工业煤气, 1993, 63(4): 27.
- [4] 沈幼庭, 何锦英. 热力系统及设备最优化[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] DAVID MERRICK. Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 2. Special heats and heats of reaction [J]. **Fuel**, 1983, 62(5): 540-546
- [6] MAHHUSUDANA C V. Thermal Contact Conductance[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1996.

(渠源 编辑)

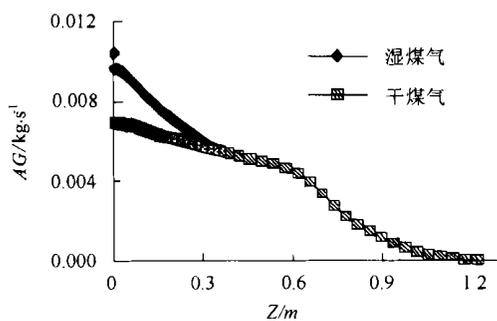


图 3 煤气质量流率分布

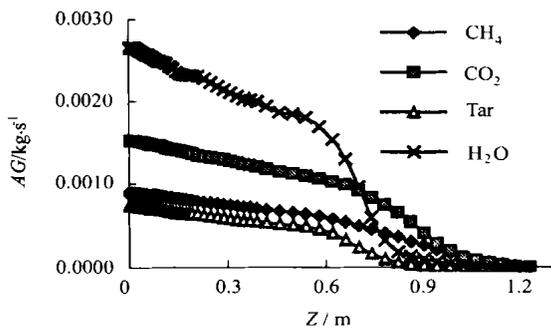


图 4 湿煤气各组分质量流率分布(一)

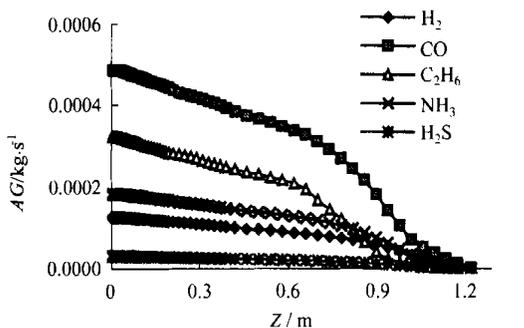


图 5 湿煤气各组分质量流率分布(二)

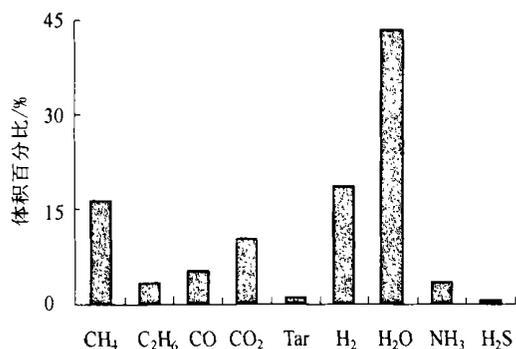


图 6 热解室出口气体组份份额

发展超临界循环流化床的讨论 = **A Discussion Concerning the Development of Supercritical Circulating Fluidized Beds** [刊, 汉] / XIN Jian, LU Jun-fu, YUE Guang-xi (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), YU Long (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 439 ~ 441

Summed up are some issues demanding due attention at the working medium side during the design of a supercritical circulating fluidized bed. Also presented are the steam-water characteristics under a supercritical pressure and the specific features of a supercritical fluidized bed as well as the flow characteristics of the working media in water walls and the type selection of the latter. **Key words:** supercritical, circulating fluidized bed, water wall

大型汽轮机状态综合评价的理论与系统研究 = **Theoretical and Systematic Study of the Comprehensive Evaluation of the Operating State of a Large-sized Steam Turbine Unit** [刊, 汉] / LI Lu-ping, ZHANG Xiao-ling, WANG Chun-mei, et al (Changsha University of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 442 ~ 444

The theory concerning the comprehensive evaluation of the operating state of a large-sized steam turbine unit is studied followed by the establishment of a mathematical model for that evaluation. On this basis a software system for the above evaluation has been developed. The main function of the software system consists in realizing a real-time comprehensive evaluation of the current operating condition of a steam turbine unit, thereby providing a basis for a decision-making concerning the condition maintenance/repair of the steam turbine unit. The above-mentioned software has also been employed for evaluating the operating state of a Chinese-made 300MW steam turbine unit. **Key words:** steam turbine unit, operating state evaluation, mathematical model, relative inferiority degree

船用汽轮机末级叶片抗蚀技术试验研究 = **Experimental Study of Erosion Resistance Techniques for the Last-stage Blades of a Marine Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Dian-xi, FAN Yi, LUO Chun-xin, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 445 ~ 446

Through hot-state erosion tests using four kinds of erosion resistance method a surface erosion-resistance technique with highly promising prospects has been identified, which conforms to the specific requirements of the last-stage blades of a marine steam turbine. This has laid a solid basis for the further engineering research of various erosion-resistance techniques. **Key words:** blade erosion resistance, laser quenching under phase transformation conditions

循环灰为热载体的移动床煤热解室数学模型 = **Mathematical Model of a Moving-bed Coal Pyrolysis Chamber with Cycling ash Serving as a Heat Carrier** [刊, 汉] / LIU Qing-hui, LU Zi-an, LI Ding-kai (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 447 ~ 450

A moving-bed coal pyrolysis chamber with cycling ash serving as a heat carrier represents a key equipment item in a coal gas - steam cogeneration system. On the basis of the following factors set up is an integrated mathematical model for a moving-bed coal pyrolysis chamber. The factors include: a sub-model based on coal drying and pyrolysis, the theory of flow and heat transfer in non-sintered porous media as well as the theory of contact heat conduction between solids and the criteria of "restricted particle diameter". With the help of the above-cited model a simulation calculation was conducted of the pyrolysis process of Longkou lignite and satisfactory results were obtained. **Key words:** coal, pyrolysis, moving bed, mathematical model