

实际锅炉中煤粉燃尽率与飞灰含碳量的预测

唐良广 郑楚光 赵海波

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室)

摘要: 建立了对实际锅炉煤粉燃尽率与飞灰含碳量预测的一维计算方法, 将煤的燃烧特性与锅炉结构特性相结合, 提出锅炉“煤性”与“炉性”相结合的计算方法。

关键词: 煤粉锅炉; 燃尽率; 飞灰含碳量

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8616(2001)s1-0014-04

1 预测模型

飞灰含碳量是燃煤锅炉的一个重要指标, 直接影响锅炉的效率, 并影响到静电除尘器的效率和飞灰的综合利用. 对于新安装锅炉和需要改变燃料的锅炉, 往往需要预示锅炉燃烧不同煤种时的运行性能. 而燃尽率是应考虑的主要性能之一. 将具体煤种与燃烧设备相联系, 并通过准确的模拟煤炭粒子燃烧的温度-时间关系, 将煤热解及挥发分的燃烧过程与煤燃烧时炭粒的主要异相燃烧过程分开考虑, 便可较精确地得到燃料的燃尽率并测量飞灰含碳量.

该预测方法的总的思路是: a. 测量燃煤的反应动力学参数. b. 将煤种参数与锅炉参数输入计算程序. c. 调整程序的输入参数, 预测飞灰含碳量. 它是将炉膛从冷灰斗间到炉膛出口分成高度可以变化的若干切片. 在切片内认为物质性质相同. 切片四周壁温与烟气温度不同. 切片划分中燃烧器区每层一次风口划在一层, 内三次风口与上一次风口之间可以划分层次也可以不划, 视两层的距离而定, 二次风不单划层时, 其风量分配到临近的一次风中去, 这时一次风层喷入量的风量取二者之和, 温度取混合以后的温度, 若一次风上仰 θ 角度或下倾 α 角度, 则将该喷入量的 $\sin\theta$ 或 $\sin\alpha$ 直接进入上层或下层.

1.1 流动模型

如图 1 所示: 在燃烧区上部认为气体以单向的形式向上流动, 即所谓柱塞流区, 该区域气体运动与颗粒同步. 柱塞流区下部为混合区, 认为混合

区存在向下的流动, 而且向下流动的烟气量的多少同进入该层的总烟气量成正比. 混合区下部为回流区. 混合区下来的气体均匀地减少并且转为上行. 若回流区有 n 层, 则在回流区最上层有 $1/n$ 的下行量转为上行, 第二层又有 $1/n$ 的量转为上行, 到了回流区最下层, 则只有 $1/n$ 的量进入并转为上行. 为了简化计算, 认为回流区不存在固体颗粒.

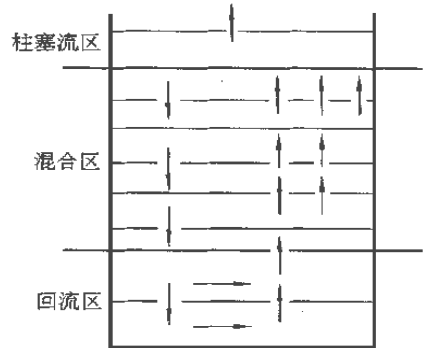


图 1 流动模型

1.2 辐射模型

本文的辐射计算是以气体黑度为基础的, 并且认为辐射只沿垂直于各表面的方向进行. 首先利用二氧化碳与水蒸气的黑度, 根据美国 CE 公司由实验得出的经验数据, 计算烟气(含固体颗粒, 辐射气体)的黑度, 采用类似计算黑度的方法计算气体域对周围壁面向其辐射的吸收系数, 然后计算气壁间的辐射热交换、气体向垂直其上下表面方向的辐射量. 计算中认为每一层气体都与所有气体域发生交换, 而且气体域向垂直方向. 其上下表面方向的辐射模型是建立在实验基础上的

收稿日期: 2000-01-10.

作者简介: 唐良广(1962-), 男, 硕士; 武汉, 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室(430074).

一种方法,与目前流行的蒙特卡洛法、区域法比较略显简单,但本文建立的程序是为应用服务的,要求较高的计算速度,较少的计算量。实践证明,该方法有较高的可靠性。

1.3 燃烧模型

焦炭的燃烧是个十分复杂的物理化学过程,大多数研究认为碳与氧反应生成 CO₂ 和 CO。炭的多相燃烧中大致有如下的几个过程: a. 氧气扩散到炭表面; b. 氧被炭表面吸附; c. 在炭表面进行化学反应; d. 燃烧产物由炭表面解析; e. 燃烧产物由炭表面向周围扩散,其中主要过程是氧向炭表面扩散和在反应表面进行燃烧反应。整体上炭燃烧速度既与炭表面上进行的化学反应本身的速度有关,也与氧向炭表面扩散的速度有关。

显然炭表面发生的化学反应所需氧量应该与扩散气流向表面输送的氧量相等,即

$$q = K_s p_s = K_d (p_\infty - p_s),$$

式中, q 为单位表面积的反应速度; p_s 为颗粒表面氧分压。由 $K_s p_s = K_d (p_\infty - p_s)$ 消去 p_s , 得

$$q = p_\infty / (1/K_d + 1/K_s).$$

因而煤粉燃尽率的变化率为 (du/dt) , 以 j 组分为例:

$$du/dt = -S_j q = -S_j [p_\infty / (1/K_d + 1/K_s)],$$

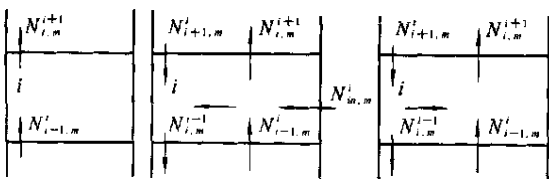
式中, S_j 为煤粉颗粒单位质量的表面积, $S_j = (d_{pj}/d_{pj0})^2 S_{j0}$; d_{pj0} 为 j 组分焦炭的初始粒径; S_{j0} 为 j 组分初始的焦炭单位质量的表面积。

1.4 炉内物质平衡

本文认为煤粉在切片内消耗的焦炭及释放出的挥发分都可以在本切片内燃烧,不考虑燃烧的中间产物,参照目前常用的计算机计算烟气量的方法。煤的可燃元素 C, H 和 S 完全燃烧生成 CO₂, H₂O 和 SO₂。煤中的 N, O 元素则认为释放后以 N₂, O₂ 的形式存在烟气中。

1.4.1 柱塞流区的物质平衡

设在 i 层释放的挥发分为 ΔM_V , 消耗的焦炭为 ΔM_C , 若 w_S, w_N, w_C, w_H, w_O 分别为挥发分中 S, N, C, H 和 O 的质量分数, 则图 2(a) 中 $N_{i,m}^{i+1}$ 为



(a) 柱塞流区 (b) 混合区 (c) 回流区

图 2 炉内物质平衡示意图

$$N_{i,B}^{i+1} = N_{i-1,B}^i + \Delta M_V w_B / \mu_b,$$

式中, μ_b 分别代表 SO₂, H₂O, N₂ 的分子质量。

$$N_{i,CO_2}^{i+1} = N_{i-1,CO_2}^i + \Delta M_V w_C / 12 + \Delta M_C / 12;$$

$$N_{i,O_2}^{i+1} = N_{i-1,O_2}^i - \Delta M_C / 12 - \Delta M_C w_C / 12 -$$

$$\Delta M_V w_H / 4 + \Delta M_V w_O / 32.$$

1.4.2 混合区的物质平衡

如图 2(b) 在混合区存在向下的流动, 设 S_i 为进入 i 层的气体总量, 则

$$S_i = \sum_{m=1}^5 (N_{in,m}^i + N_{i-1,m}^i N_{i+1,m}^i).$$

$$N_{i,B}^{i+1} = (N_{in,B}^i + N_{i-1,B}^i + N_{i+1,B}^i + \Delta M_V w_B / \mu_b) (1 - e_i);$$

$$N_{i,B}^{i-1} = (N_{in,B}^i + N_{i-1,B}^i + N_{i+1,B}^i + \Delta M_V w_B / \mu_b) e_i.$$

$$N_{i,CO_2}^{i+1} = (N_{in,CO_2}^i + N_{i-1,CO_2}^i + N_{i+1,CO_2}^i + \Delta M_V w_C / 12 + \Delta M_C / 12) (1 - e_i);$$

$$N_{i,CO_2}^{i-1} = (N_{in,CO_2}^i + N_{i-1,CO_2}^i + N_{i+1,CO_2}^i + \Delta M_V w_C / 12 + \Delta M_C / 12) e_i;$$

$$N_{i,O_2}^{i-1} = (N_{in,O_2}^i + N_{i-1,O_2}^i + N_{i+1,O_2}^i + \Delta M_V w_O / 32 - \Delta M_C / 12 - \Delta M_S w_S / 32 - \Delta M_V w_H / 4) (1 - e_i);$$

$$N_{i,O_2}^{i+1} = (N_{in,O_2}^i + N_{i-1,O_2}^i + N_{i+1,O_2}^i + \Delta M_V w_O / 32 - \Delta M_C / 12 - \Delta M_S w_S / 32 - \Delta M_V w_H / 4) e_i.$$

对混合区的每一层列出上述方程, 就可以联立起来, 用求解线性方程的办法求出各层的 $N_{i,m}^{i+1}, N_{in,O_2}^i, N_{i-1,m}^i, N_{i+1,m}^i$.

1.4.3 回流区的物质平衡

回流区共 n 层, 则对图 2(c) 的流型有

$$N_{i,m}^{i+1} = N_{i-1,m}^i + (1/n) N_{i+1,B}^B \cdots N_{i,m}^{i-1} = N_{i-1,m}^i - (1/n) N_{i+1,B}^B.$$

1.5 炉内能量平衡

1.5.1 炉内气体域的热平衡

i 层达到热平衡时, 存在下述关系:

$$H_i + Q_{ai} + \Delta Q_V + \Delta Q_C = L_i + Q_{zi} + Q_{Ri}, \quad (1)$$

式中, H_i 为烟气带入 i 层的焓; Q_{ai} 为气体域射入 i 层能量; ΔQ_V 为挥发分燃烧放热量; ΔQ_C 为焦炭燃烧放热量, $\Delta Q_C = hc \Delta M_C$ (hc 为焦炭的热值; ΔM_C 为焦炭消耗量); L_i 为烟气离开 i 层的焓; Q_{zi} 为 i 层气体向高度方向辐射的能量; Q_{Ri} 为 i 层气体与壁面换热量。

变换方程 (1), 得

$$L_i + Q_{zi} = H_i + Q_{ai} + \Delta Q_V + \Delta Q_C - Q_{zi};$$

$$T_{gi} = (H_i + Q_{ai} + \Delta Q_V + \Delta Q_C - Q_{zi}) / (L_i / T_{gi} + Q_{zi} / T_{gi}).$$

采用上式迭代求解各气体切片的温度.

1.5.2 炉内壁面之间的热平衡

烟气与壁面之间的换热,若忽略对流换热,则烟气与壁面之间只有辐射换热.该量与壁面向工质的传热量 Q_{sgi} 相等.

$$Q_{sgi} = A_i(T_{wi} - T_f) / R_i,$$

式中, T_f 为工质温度 (K); R_i 为管壁等效热阻. 因为 $Q_{sgi} = Q_{Ri}$, 将方程整理成下面的形式: $T_{gi} = R_i Q_{Ri} / A_i + T_f$. 采用迭代法就可以得出壁温的分布.

2 预测实例

切片的划分:为了体现喷嘴位置的影响,并且为了体现该区域的混合特性,将一次风口与其周围的二次风口划为一层,认为此时注入的空气温度为该层内二次风与一次风的质量平均值.不与一次风临近的二次风口单独划为一层,三次风单独划分注入,同样,温度采用周围二次风分配入该层的量与三次风量的质量平均温度.

利用已知工况的试验结果对输入数据进行调整,就是综合调整壁面热阻和回流率,使烟气温度分布及燃尽率与已知工况的实测值相符.对于壁面热阻的调整:根据热力计算的标准,壁面等效热阻在 $0.72 \sim 5.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$ 的范围内.在实际调整中,燃烧器区取一值,其余的取另一值,相差

$0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$. 回流率的调整为:混合区各层的回流率取同一值, $0.2 \sim 0.5$ 之间.然后可以保持它们的值不变,来预测其他工况.计算流程图如图 3 所示.

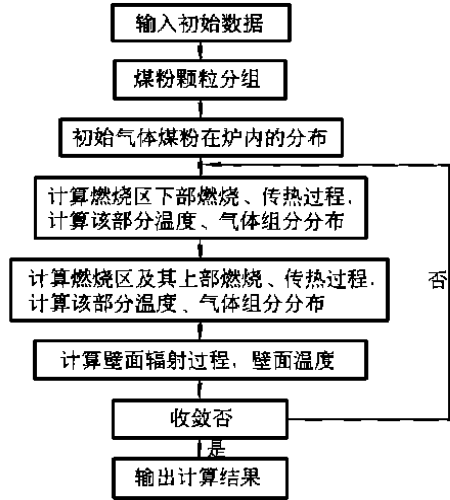


图 3 计算流程

表 1 中对电厂已知工况预测结果计算如下/煤种应用基成分: $w_C = 53.46\%$, $w_H = 2.7\%$, $w_O = 3.57\%$, $w_N = 0.76\%$, $w_S = 1.03\%$, $w_A = 31.76\%$, $w_W = 6.72\%$. 应用基固定碳及挥发分: $F_C = 52.63\%$, $P_V = 8.89$.

总耗煤量 36.1265 kg/s .

炉膛宽度 11.97 m .

炉膛切片划分层数 30.

燃烧器区下部切片划分层数 6.

燃烧器区切片划分层数 6.

表 2 给出了计算值与实测值的比较结果.

本预测模型采用的技术路线是将煤的燃烧特

表 1 汉川电厂 1 025 t/h 锅炉灰飞含碳量计算机数值模拟结果

层数	T_p/K	C_c	$D_h/\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$	p_0/Pa	$f_{\text{CO}_2}/\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
1	1 270.96	0.000 00	70.424	0.000 000	0.076 6
6	1 643.55	0.000 00	192.700	0.000 000	0.461 3
11	1 848.01	0.701 29	283.993	$0.282 259 \times 10^{-1}$	1.124 0
16	1 700.79	0.848 37	217.033	$0.638 504 \times 10^{-1}$	1.247 0
21	1 641.80	0.901 79	192.732	$0.543 505 \times 10^{-1}$	1.346 0
26	1 547.25	0.926 41	156.571	$0.499 736 \times 10^{-1}$	1.392 0
30	1 434.90	0.935 32	117.458	$0.483 899 \times 10^{-1}$	1.408 0

注:灰飞含碳量为 11.1% ; T_p 为切片烟气温度, C_c 为可燃物燃尽率, D_h 为水冷壁热流密度, p_0 为氧分压, f_{CO_2} 为烟气中 CO_2 流量

表 2 计算结果与实测值的比较 (w/%)

煤种	燃尽率计算值	燃尽率实测值	飞灰含碳量计算值	飞灰含碳量实测量
金竹山	90.838	91.18	25.6	25.15
莱阳	87.914	87.96	13.3	

性与数学模型相结合用于实际锅炉的计算,并且通过实际锅炉已知工况的实验结果修正计算程序

中某些不易确定的输入参数, 然后运用计算程序就可以预测其他未知工况. 本预测方法可以预测燃煤锅炉的燃尽率与飞灰含碳量. 当机组需要更换新煤种或掺烧新煤种时, 也可以用本预测方法对煤种的适应性做出预测以决定取舍. 该预测方法能够体现煤种的差异, 以及锅炉燃烧器及炉膛的结构参数, 两者结合, 能够做出比较准确的预测锅炉燃尽率与炉膛出口飞灰含碳量. 很好地解决

了“煤性”与“炉性”的适应性问题, 具有较大的工程实用性.

参 考 文 献

- [1] 孙学信, 陈建原. 煤粉燃烧物理化学基础. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.
- [2] 陈 鸿. 煤粉孔隙结构及燃尽动力学的研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中理工大学煤燃烧国家重点实验室, 1995.

The Prediction of Burning Rate of Coal and the Amount of Carbon in Ash in a Practical Boiler

Tang Lianguang Zheng Chuguang Zhao Haibo

Abstract: A simple and efficient model is developed which can be used to predict unburned carbon content of flying ash and to calculate burnout rate. This model combines kinetic reaction of coal with structure and operates parameter of boiler. The prediction model of burning rate of coal and the amount of carbon in ash in a practical boiler has made considerable practicality in engineering.

Key words: pulverized coal fired boiler; burnout rate; unburned carbon content of flying ash

Tang Lianguang Master; State Key Lab. of Coal Combustion, HUST Wuhan 430074, China.

《华中科技大学学报》稿件要求 (3)

关键词 关键词是反映文章主题内容的名词和术语, 是检索文章的关键 (主题关键), 而不是文章得以成立的关键 (技术关键). 选取的关键词应保证其准确性 (对主题而言) 和正确性 (对书写而言). 每篇文章必须给出 3~8 个关键词 (中英文对照), 并分别写在中、英文摘要下方, 其顺序及个数应一致. 第一个关键词应能体现出文章的学科分类.

首页页下注 在文章首页下方应注明: a. 收稿日期: 年 月 日. b. 第一作者姓名, 性别, 出生年, 职称; 所在地, 单位 (邮编). c. 基金资助项目及项目号.

标题层次 正文层次标题应简短明确, 各层次序号依次为“1”, “1.1”, “1.1.1”等, 一律左顶格, 后空一格写标题. 若“1.1.1”后还有小层次, 则分别另起行 (空两格) 用“a.”, “b.”, “c.”, …表示.

数学公式 由于讨论问题的需要, 在叙述中要引用的公式才编号 (公式号右顶格), 且另行居中; 不引用的公式不编号. 不编号的简短公式一般随文写, 但较长且较复杂的无编号公式可另行居中. 全文公式统一连续编号; 定理、引理、定义、推论等也分别统一连续编号.