**掺烧煤泥循环流化床锅炉床温机理建模**

煤泥是煤炭深加工后产生的废弃物，具有粒径小，含水量高，含灰量高，持水性强，粘度大等特点，且难以贮藏和运输，长期堆积在室外会造成环境严重污染。循环流化床锅炉在燃料适应性，变负荷能力及污染物排放方面具有独特优势。因此CFB锅炉煤泥掺烧技术为降低火电厂发电成本，减少环境污染提供了一条有效途径。

CFB锅炉内部燃烧过程复杂，燃烧控制系统对象具有多变量、强耦合和大迟延等特性。床温作为燃烧控制系统的关键被控量，最佳温度为850℃~900℃。床温过高会使脱硫效率降低，床层容易结焦，过低会导致燃烧效率降低。在掺烧煤泥CFB锅炉中，煤泥掺烧会使锅炉床温降低，严重时可导致锅炉灭火。因此，建立掺烧煤泥CFB锅炉床温动态模型，实时预测锅炉床温，对于维持机组的安全稳定运行意义重大。

本文以中利电厂300MW循环流化床机组为例，该CFB锅炉露天布置，主要由单炉膛、四个高温绝热旋风分离器、四个回料阀、四个外置床、尾部对流烟道、四台滚筒冷渣器和一个回转式空预器构成。单炉膛采用裤衩腿结构、双布风板，炉膛内蒸发受热面采用膜式水冷壁及水冷壁延伸墙结构。



将炉膛分为密相区和稀相区，分别建立氧量平衡，床料质量平衡，残碳平衡，能量平衡方程。最终建立以一次风量、二次风量、给煤量、煤泥量、石灰石量为输入，床温为输出的机理模型。

机理建模假设：

1. 锅炉与外界完全隔热，也无漏风；
2. 各相区内碳完全燃烧，且产物只有CO2;
3. 假设未燃尽的燃料分布均匀；
4. 不考虑密相区与稀相区交界面之间的能量与物质交换；
5. 假设挥发分在密相区完全燃烧；
6. 忽略耐热层和受热管本身的吸热；
7. 忽略排渣对炉内床料质量和床温的影响；

## 1.循环流化床锅炉炉膛动态模型

### 1.1氧量平衡方程：

密相区：

稀相区：

其中，分别为密相区和稀相区的体积()；分别是密相区和稀相区的氧气体积分数(%)；是空气中氧气的体积分数(%)；分别为一次风量、二次风量和流化风量()；为密相区和稀相区碳燃烧消耗的氧量()；是挥发分燃烧消耗氧量()；是密相区流向稀相区烟气中的含氧量是流出稀相区的烟气中的含氧量。

### 1.2床料质量平衡方程：

密相区：

稀相区：

其中、分别为密相区和稀相区的床料质量(kg)；分别是原煤量、煤泥量和石灰石量(kg/s)；是混煤中挥发分的质量(kg/s)；是循环物料量(kg/s)；,分别是密相区和稀相区碳燃烧反应速率(kg/s)；是离开密相区进入稀相区的床料量(kg/s)；是炉膛出口床料量(kg/s)。

根据Yates和Rowe提出的经验公式，，可以表示为：





是系数，，分别为密相区和稀相区内流体的实际流化速度，是临界流化速度；







（气体密度考虑其密相区的压力温度，算出相应值）

其中分别是密相区和稀相区的通风截面积；分别代表床料颗粒粒度、流化气体运动粘度、床料颗粒密度和气体密度。

是循环物料量，是由冷灰和热灰组成：



### 1.3残碳质量平衡：

密相区：

稀相区：

其中，，表示密相区和稀相区的残碳质量；表示燃料收到基碳含量；，分别表示密相区碳燃烧反应速率和稀相区碳燃烧反应速率。

在CFB炉膛内，单个碳颗粒的燃烧速率(kg/s),设炉膛内蓄积的焦炭颗粒的平均粒径为，则总体燃烧反应速率，即密相区碳燃烧反应速率和稀相区碳燃烧反应速率分别为：







为焦炭表面化学反应速率：

 



为扩散反应速率：



认为燃烧室内气固充分混合并忽略气体返混，Sherwood数由Chakraborty和Howar提出计算关系式：









一般情况下，，，在1800~2000之间，为空隙率，为Sherwood数，反映边界层的气体传质对燃烧的影响；Sc为Schmidt数。为氧气扩散系数，它是温度和压力的函数：



式中是在参考温度和参考压力下的氧气扩散系数值。当=1500K，=1.013bar时，=。

### 1.4能量平衡：

密相区：

 

稀相区：



其中：，是密相区和稀相区温度(℃)；分别是给煤、床料、石灰石、空气、烟气的比热容(KJ/kg℃)；是石灰石反应放热量；,分别是床料初温、一次风初温和二次风初温；是燃料低位发热量；是挥发分燃烧放热量； 是水冷壁吸热量；是循环物料量带入炉膛的热量(KJ/s)

## 2.分离器动态模型

 由于分离器内气体流动过程较为复杂，很难求取临界流化速度和实际流化速度，，因此本文采用燃烧份额表示分离器内的碳消耗量。

当部分粒度较小的物料被气流夹带出炉膛，旋风分离器起到床料与烟气分离的作用。假设某一时刻分离器内物料量为，一部分物料进入回料阀循环燃烧；一部分作为飞灰随烟气排出，另一部分在分离器内燃烧消耗，且这个过程反应较快，下一时刻床料量由补充。以分离器为研究对象。建立平衡方程：



令，其中表示旋风分离器的分离效率，可得



### 2.1床料平衡方程



### 2.2残碳质量平衡



### 2.3能量平衡：



式中：分别表示分离器内床料温度，床料质量和残碳质量，是烟气量；为飞灰量。

## 3.外置床动态模型

分离器分离下来的一部分床料进入外置床，与其内部的受热面进行热交换后作为冷灰进入炉膛，从而达到调节床温的目的。由于外置床对物料而言是一个封闭的环境，仅存在热量交换，因此建模中只需考虑能量平衡：



是分离器出口温度；是各换热器工质流量；表示各工质焓差；是流化风初温。

## 4.参数计算：

### 4.1分离效率计算

当炉膛达到一定高度时，炉膛内物料浓度变化不大，只在炉膛出口处略有增加。可简化认为分离器烟气携带物料浓度与炉膛中上部平均物料浓度相等，利用中下部与炉膛出口的压差可以计算出分离器入口烟气携带物料浓度，即：



其中：—炉膛上部差压，（已知测点）

 —重力加速度，9.81；

—压力测点到炉膛出口的距离，；

—分离器入口烟气携带物料浓度，

分离器出口物料浓度： 

其中：—分离器出口物料浓度，

—分离器出口飞灰总流量，

—分离器出口烟气流率，

则分离器分离效率为：



是回料阀出口温度；是外置床出口温度。

### **4.2烟气参数计算：**

假设烟气中只含五种成分，按照各气体所占烟气比例可求出烟气比热容，其中来源于：(1)石灰石煅烧 (2)碳燃烧生成；来源于：(1)空气中的氮气 (2)燃料中的N元素；来源于：(1)燃料中的水分 (2)燃料中H元素反应生成。

|  |  |
| --- | --- |
|  | 比热容(KJ/kg℃) |
| 空气 | 1.005 |
| 煤炭 | 0.92 |
| 石灰石 | 0.59 |
| 床料 | 0.8 |

|  |  |
| --- | --- |
|  | 气体体积密度(标况下，g/L) |
|  | 1.96 |
|  | 1.25 |
|  | 0.804 |
|  | 2.86 |
|  | 1.429 |

表示石灰石的纯度，工业报告显示为95%，分别代表石灰石分解率和脱硫效率：



总灰量：（1）燃料含灰量；（2）石灰石杂质；（3）未分解的碳酸钙；（4）未反应的氧化钙；（5）脱硫反应生成的硫酸钙；



已知烟气中残碳的质量即飞灰中残碳的质量，根据残碳质量平衡可以求的飞灰量，继而可知底渣量。

### 4.3静态系数计算

由残碳质量平衡方程及床料质量平衡方程，根据各测点已知数据，可求得未知数  。此前稀相区氧气浓度可以根据空预器出口含氧量直接得出，而密相区氧量需要根据氧量质量平衡方程求解：



其中碳燃烧消耗氧量需要根据碳燃烧速率求出，因此采用如下思路进行循环迭代计算：

