

文章编号:1000-582X(2006)03-0045-03

# 440 t/h 循环流化床锅炉汽冷式旋风分离器动态仿真\*

万里鹏,苟小龙,李波,郝相俊  
(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

**摘要:**以440 t/h循环流化床锅炉汽冷式旋风分离器为研究对象,建立了对象的动态数学模型.在数学模型的基础上,采用高级连续系统仿真语言(ACSL)建立了对象的仿真模型.通过仿真试验及分析,证明了模型的正确性,该模型能为旋风分离器的运行及优化设计提供一定的理论指导.

**关键词:**循环流化床锅炉;汽冷式;旋风分离器;仿真

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

循环流化床锅炉在运行过程中,炉膛出口烟气携带大量未燃尽的颗粒进入旋风分离器进行物料的分离及回送,绝大部分物料颗粒从烟气流中分离出来并被回料器回送至炉膛,同时烟气与分离器壁面进行热量传递.分离器排出的烟气经由尾部竖井的再热器、过热器、省煤器及空气预热器进入除尘器,最后由引风机抽进烟囱,排入大气.在这个过程中,烟气流与受热面的热量交换十分重要,它决定了锅炉系统汽水侧的进出口参数,从而影响到整个锅炉的性能.目前关于旋风分离器的整体动态建模的研究较少,而对于汽冷式的分离器的研究则更少.因此对这样一个非线性、多变量紧密耦合的对象,建立相应的动态数学模型,研究其在各种参数变动下的动态特性有较强的实用性.

笔者研究的对象为江苏大屯矸石电厂135 MW循环流化床锅炉高温旋风分离器,锅炉最大连续蒸发量为440 t/h,额定蒸汽压力为13.7 MPa,分离器内额定过量空气系数为1.2.研究目的是对该锅炉系统中的高温汽冷式旋风分离器建立数学模型并进行仿真分析.

如图1所示,此旋风分离器为膜式包墙过热器结构,分离器上半部分为圆柱形,下半部分为锥形,烟气出口为一个端部敞开的圆柱体.细颗粒和烟气先旋转下流至圆柱体底部,而后向上流动离开旋风分离器.粗颗粒落入直接与旋风分离器相连接的J阀回料器立管.

## 1 数学模型的建立

建立分离器的模型前,对其作以下假设:1)忽略回料装置固体颗粒的损失;2)分离器进口烟气中的颗粒分布均匀;3)分离器内只考虑焦炭和一氧化碳的燃

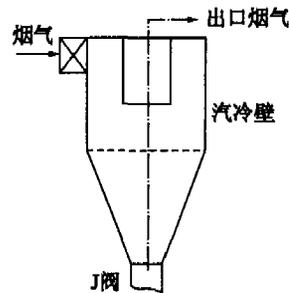


图1 汽冷式旋风分离器结构图

烧;4)分离器气固充分混合;5)不考虑分离器内的颗粒磨损;6)2台气冷式旋风分离器用1个等效的分离器模型模拟.

由于分离器入口烟温达到850℃,烟气中未燃尽的物料颗粒浓度较大,氧气浓度满足再燃条件(约为4%左右),物料中可燃的氮、硫及其化合物成分较低可以忽略.故引入假设3)对分离器内的二次燃烧过程进行合理的简化.

### 1.1 分离器的动态质量平衡方程

根据质量平衡方程,有关系式:分离器中颗粒的质量积累量=进入分离器的颗粒质量-分离器内燃烧损失的颗粒的质量-进入返料装置的颗粒质量-排出分离器(飞灰)的颗粒质量<sup>[1]</sup>.用方程表示为:

$$\frac{dW_{cs}}{d\tau} = W_{ge} - W_{cb} - W_{pl} - W_{gl} \quad (1)$$

则第*i*档颗粒组的质量平衡方程可写为:

$$\frac{dW_{cs,i}}{d\tau} = W_{ge,i} - W_{cb,i} - W_{pl,i} - W_{gl,i} \quad (2)$$

式中, $W_{ge,i}$ 为分离器进口烟气质量流量; $W_{cb,i}$ 为分离器中由于燃烧损失的颗粒质量流量,按下式计算:

$$W_{cb,i} = 1.2 \times 10^{-2} n_i R_{c,i} \quad (3)$$

\* 收稿日期:2005-11-17

作者简介:万里鹏(1979-),男,江西南昌人,重庆大学硕士研究生,主要从事热力系统及设备的计算机仿真与控制研究.

式中,  $R_{c,i}$  为第  $i$  档颗粒中碳的燃烧反应速率, mol/s;  $n_i$  为第  $i$  档炭的颗粒数量.

分离器出口圆筒排出的飞灰质量率<sup>[2]</sup>为:

$$W_{gl,i} = (1 - \eta_i)(W_{ge,i} - W_{cb,i}). \quad (4)$$

进入返料装置的颗粒质量率为:

$$W_{pl,i} = \eta_i(W_{ge,i} - W_{cb,i}). \quad (5)$$

上述各式中, 流量单位为 kg/s.

### 1.2 分离器的分级分离效率

高温旋风分离器中固体颗粒的分离有 2 种情况. 一是当固体颗粒的流动超过了气体的饱和和夹带能力时直接下落的分离; 二是固体颗粒在悬浮气体边缘的分离. 剩余的颗粒则处于流向分离器中心的气体的曳力和颗粒旋转的离心力之间的平衡之中, 这些平衡颗粒的粒径即为所谓的切割粒径  $d_{50}$ , 即分离效率为 50% 时的粒径, 大于这一直径的颗粒极有可能在旋风分离器中被分离出来, 而小于这一直径的颗粒被分离的可能性就小得多. 分离器的分级分离效率按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$\eta_i(d_p(i)) = \left[ \left( \frac{d_p(i)}{1.3d_{50}} \right) / \left( 1 + \frac{d_p(i)}{1.3d_{50}} \right) \right]^{4.5}. \quad (6)$$

上式中的  $d_{(i)}$  为各档颗粒的中位粒径, 切割粒径  $d_{50}$  则根据以下公式计算<sup>[4]</sup>:

当  $0.17 < \sqrt{A_{in}}/D_w \leq 0.41$  时,

$$d_{50} = \left( \frac{9\mu r_c}{3\pi\rho_p \bar{H}_c v_{in}} \right)^{1/2} \bar{R}^{(n-1)}.$$

当  $\sqrt{A_{in}}/D_w \leq 0.17$  时,

$$d_{50} = \left( \frac{9\mu r_c \bar{A}}{3\pi\rho_p \bar{H}_c v_{in}} \right)^{1/2} \bar{R}^n. \quad (7)$$

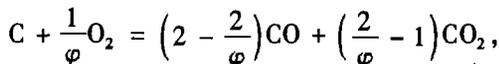
式中,  $A_{in}$  为分离器进口处的断面积,  $m^2$ ;  $D_w$  为分离器圆筒段直径,  $m$ .

### 1.3 分离器内的燃烧特性

考虑到模型的简化, 对分离器内物料的继续燃烧作如下假设: 1) 发生燃烧的前提温度等于分离器进口烟温; 2) 燃烧只在一定的体积空间内发生.

#### 1.3.1 焦炭的燃烧

焦炭的化学反应方程式如下:



式中,  $\varphi$  为机械因子, 由经验公式<sup>[5]</sup>确定.

焦炭的反应速度  $R$  (mol/ $m^3 \cdot s$ ) 可由代数方程  $R_c =$

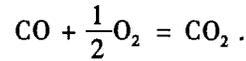
$$\sum_{i=1}^n n_i R_{c,i} \text{ 得到}^{[5]}.$$

其中,  $R_{c,i} = \pi d_{c,i}^2 k_{c,i} Y_{O_2}$ ; 第  $i$  档炭的颗粒数量为

$$n_i = W_{ge,i} / \left( \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_p^3(i)}{6} \right).$$

#### 1.3.2 一氧化碳的燃烧

一氧化碳的燃烧反应方程:



单位体积内的反应速度<sup>[5]</sup> (mol/ $m^3 \cdot s$ ) 为:

$$R_{CO} = K_{CO} Y_{CO} Y_{O_2}^{1/2} Y_{H_2O}^{1/2},$$

其中,  $Y$  为浓度, 参数  $K_{CO} = 3.25 \times 10^7 \exp\left(-\frac{15098}{T}\right)$ .

### 1.4 分离器内的动态能量守恒方程

根据能量守恒定理, 对分离器的能量传递过程建立如下方程:

$$\frac{dh_{gl}}{dt} = \frac{k[W_{ge}h_{ge} - W_{gl}h_{gl} + q_b - q_{gw} - q_{pl}]}{\rho_{gl}V_g}, \quad (8)$$

式中, 燃烧产生的总热量为  $q_b = q_{bc} + q_{bm}$ ; 出口处烟气密度  $\rho_{gl} = P_0/(RT_{gl})$ ;  $h$  为烟气的比焓 (J/kg);  $k$  为多变过程指数取 1.4.

焦炭和一氧化碳燃烧产生的热量分别为:

$$q_{bc} = V_b R_c T_b [(c_c + O_{O_2}) - (c_c O + O_{CO_2})],$$

$$q_{bm} = V_b R_{CO} T_b [(c_{CO} + c_{O_2}) - C_{CO_2}],$$

式中,  $V_b$  为燃烧区域的体积;  $T_b$  为燃烧区域的温度;  $c$  为定压比热容.

分离器中烟气流与壁面的换热量为:

$$q_{gw} = k_{gw}(1 - F_{ng})(T_g - T_w), \quad (9)$$

式中,  $k_{gw}$  为烟气与壁面间的换热系数;  $F_{ng}$  为结渣系数;

烟气温度  $T_g = \frac{T_{gl} + T_{pl}}{2}$ ,  $T_{gl} = h_{gl}/c_{gl}$ .

分离器中被分离的物料进入返料装置带走的热量为:

$$q_{pl,i} = W_{pl,i} c_p T_{pl}. \quad (10)$$

## 2 仿真结果分析

基于数学模型, 笔者采用高级连续系统仿真语言 ACSL 建立对象的仿真模型<sup>[6]</sup>, 采用自动变阶变步长的 GEAR 算法进行模型的求解. 通过调试找到系统的稳态以后, 为了验证模型的正确性进行了一系列的仿真试验.

根据程序运行结果首先得到额定工况下分离器分级分离效率随颗粒直径的变化曲线, 如图 2 所示. 由图 2 可知, 分离器的分级分离效率是随煤粉颗粒的粒径增大而增大的, 符合其基本规律, 并且所得数据与设计值较吻合.

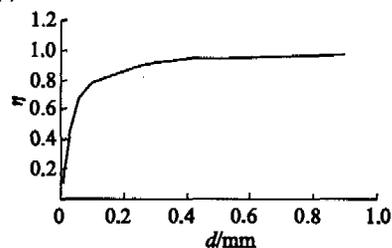


图 2 分离器分级分离效率随颗粒粒径的变化

当系统经过一段时间运行达到稳态后, 为验证模型的正确性, 对系统进行如下的仿真试验:

1) 进口烟温阶跃扰动. 进口烟气温度阶跃降低2.7%. 则烟气在分离器的出口处的温度随着时间的变化如图3所示. 从图可以看出, 出口烟气温度在经过大约260 s的持续减小后最终趋于稳定.

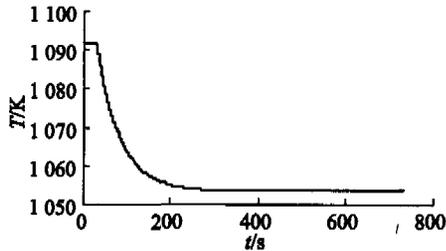


图3 进口烟温扰动仿真试验

在其它条件不变的情况下, 进口烟气温度的降低必将导致烟气出口温度的降低. 进口烟温的降低会使分离器中颗粒继续燃烧区域的温度降低, 从而导致由焦炭和一氧化碳燃烧产生的热量减小, 并且分离器中烟气与汽冷壁之间的换热量也会减小. 这些因素同时作用, 决定了出口烟气温度是个逐渐降低并最后达到稳态的过程.

2) 进口烟气流速阶跃扰动. 在系统运行至稳态后调节分离器入口挡板, 使其开度阶跃减小约15%, 则仿真试验结果图如图4所示, 出口烟气温度在经过大约250 s的递增后趋于稳定, 系统再次进入稳态.

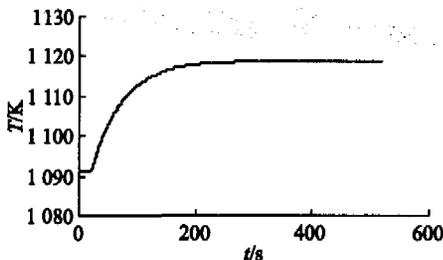


图4 进口烟气流速扰动仿真试验

分离器入口挡板开度的减小会导致进口烟气流速的降低, 流速下降则会造成分离器分离效率下降, 从而有更多的颗粒未能被分离而从分离器上部的出口排出, 这些颗粒本身携带一定的热量, 因而会造成出口烟气温度上升. 进口烟气流速的降低也会使分离器中由于颗粒继续燃烧所产生的热量减小. 以上2个因素决定了分离器出口烟气温度的变化, 使之逐渐增大并最终趋于稳定.

### 3 结论

以440 t/h 循环流化床锅炉分离器为研究对象, 基于分离器模型所进行仿真试验的结果符合实际规律. 通过仿真试验证明所建立的分离器动态模型能比较准确地反应系统的动态特性, 在系统的设计和优化运行方面具有一定的实用价值.

### 参考文献:

- [1] 王擎, 姜秀民, 李学恒. 循环硫化床锅炉循环回路过程动态模拟[J]. 东北电力学院学报, 1999, 19(1): 11 - 19.
- [2] 杨晨, 何祖威, 辛明道. 410 t/h Pyroflow 循环流化床锅炉流动过程数学模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1999, 22(3): 72 - 78.
- [3] 杨晨, 何祖威, 辛明道. 大型循环流化床锅炉固体颗粒流动及分布的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(3): 238 - 243.
- [4] 井伊谷刚一. 除尘装置的性能[M]. 马文彦译. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [5] HAO LIU, BERNARD M. Gibbs Modelling of NO and N<sub>2</sub>O Em-issions from Biomass-fired Circulating Fluidized Bed Combustion[J]. Fuel, 2002, 81: 278 - 280.
- [6] 何祖威, 朱慕铨, 唐胜利. 高级连续系统仿真语言 ACSL 及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990.

## Dynamic Modeling and Simulation of 440 t/h Steam-cooled Cyclone Separator for CFB Boiler

WAN Li-peng, GOU Xiao-long, LI Bo, HAO Xiang-jun

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A dynamic mathematical model of the steam-cooled cyclone separator in a 440 t/h CFB boiler has been established. Based on the mathematical model, simulation model of the cyclone separator is created with the advanced continuous simulation language (ACSL). The validity of this model has been verified by the simulation experiments and analysis. This model can provide a theoretical guidance for operation and optimal design of the cyclone separator.

**Key words:** CFB; steam-cooled; cyclone separator; simulation