

循环流化床烟气脱硫床料的质量平衡和化学成份的变化

樊保国, 祁海鹰, 由长福, 陈昌和, 徐旭常

(清华大学 煤的清洁燃烧国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 对循环流化床内脱硫过程中床料的质量、化学成份的变化进行了理论分析, 发现当选定循环倍率 5~50 后, 只要分离器的效率达到 83%~98%, 床内就可以维持质量平衡。当操作参数变化引起床内物料质量改变时, 改变离开床的床料量可以很快达到平衡; 而化学成份的动态是不平衡的, 它的过渡过程与床内的床料量、反应产物的产率以及相关参数的变化幅度等有关。

关 键 词: 循环流化床; 烟气脱硫; 床料质量和化学成份

中图分类号: TK229.6⁺6

文献标识码: A

符 号

A —床面积, m^2	C —床料中亚硫酸钙的含量
C_{Ca} —床料中 CaO 的含量	C_{sd}^0 —床料中亚硫酸钙的初始含量
C_{∞} —床料中亚硫酸钙的平衡含量	G_s —循环床的循环流率, $kg/(m^2 \cdot s)$
m —床料总质量, kg	m_d —从床中排放的物料量, kg/s
m_a —加入床中的固体物料, kg/s	m_e —从分离器离开系统的物料量, kg/s
m_{ds} —加入床中的脱硫剂量, kg/s	m_{SO_2} —进入系统的 SO_2 量, kg/s
m_s —进入系统的固体总量及生成的亚硫酸钙量, kg/s	R —物料的循环倍率
N_{sd}^* —亚硫酸钙量的生成率, kg/s	r —钙硫摩尔比
t_0 —初始时刻	Δt —时间间隔, s
δ —所生成的物料从分离器离开额	η —分离器的效率, %
	η_s —脱硫效率, %

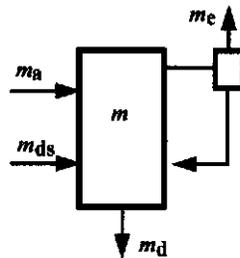
1 引言

循环流化床作为一个开口系统, 要维持其正常运行, 除了保证相关动力学参数的变化在一定范围, 特别要保证进出体系的床料之间的平衡。对有化学反应的系统, 床料的平衡还要考虑化学反应所造成的固相的溶解、气化, 或气相的固化, 对循环流化床锅炉, 可将床内的颗粒按尺寸分成许多档, 分别建立

物料的平衡、循环与分布模型^[1-2], 也可以对循环流化床锅炉的循环系统建立模型^[3]。所以对脱硫反应时影响床内固相质量平衡的因素, 进出床的物料之间的关系以及床料中化学成份的变化寻找出一个简单的关系, 无论对实际设备的运行或实验装置的操作都十分有意义。以下分别对循环流化床烟气脱硫系统的质量平衡和床内的化学成分的变化作一分析。本文为简化起见假定系统是均匀的零维模型。

2 循环流化床的质量平衡

2.1 循环倍率与分离器的效率



考虑图 1 所示的系统, 假定床内的床料质量为 m , 随烟气进入的固体物料 m_a , 加入的脱硫剂量 m_{ds} , 离开分离器的量 m_e , 排出系统的床料 m_d , 系统的循环流率 G_s , 床截面积 A 。那么要保证床内的质量平衡, 则进出床的物料应有如下关系, 即:

$$m_a + m_{ds} = m_e + m_d \quad (1)$$

一般情况下, 循环流化床的循环倍率 R 在 5~50 之间^[4], 即, $G_s \cdot A / (m_a + m_{ds}) = 5 \sim 50$, 考虑极限情况, 即不考虑排料时, $m_e = m_a + m_{ds}$, 则只有分离器的效率满足以下关系时方能维持系统的质量平衡,

$$\eta = \frac{G_s \cdot A}{G_s \cdot A + m_e} = \frac{G_s \cdot A}{G_s \cdot A + (0.2 \sim 0.02) G_s \cdot A} = 83\% \sim 98\%$$

也就是说, 选定了循环倍率后, 分离器的效率必须大于以上值, 系统才能正常运行。针对不同的循环倍率, 可以得到相应的分离器效率的最小值。如表 1 所示。如果床底还有排料, 那么在保持平衡的前提下,

要维持所选定的循环倍率, 分离器的效率还要增加。

表1 不同循环倍率所对应的分离器效率

循环倍率	5	10	20	30	40	50
分离器效率 / %	83	91	95	97	97.6	98

2.2 脱硫反应所引起系统质量的变化

当循环流化床反应器中有下式的脱硫反应时,



如果烟气中含硫量为 m_{SO_2} , 脱硫效率为 η_s , 那么经过反应床内的固体物料量将会增加 $m_{SO_2} \cdot \eta_s / 100$, 这样循环流化床的排料量应当有所增加。此时式(1)变为:

$$m_a + m_{ds} + m_{SO_2} \cdot \eta_s / 100 = (m_e + \delta m_{SO_2} \cdot \eta_s / 100) + [m_d(1 - \delta) m_{SO_2} \cdot \eta_s / 100] \quad (3)$$

其中 δ 为所增加的质量中从分离器离开系统的份额。

表2为针对 SO_2 浓度为 $10\ 000\ mg/m^3$, 含灰量为 $26\ g/m^3$ 的烟气, 假定脱硫效率为 100% , 钙硫比和循环倍率取不同值时, 脱硫反应所增加的固体量与加入总量的比、与参与循环固体量的比, 以及存在脱硫反应时的排料量与原排料量(无脱硫反应)之比。

表2 脱硫反应所增加的固体量与加入固体总量, 与循环固体量之比, 排料量与原排料量(无脱硫反应)之比

Ca/S	1		2		3	
与加入总量比 / %	29		23		19	
循环倍率	10	20	30	10	20	30
与循环量比 / %	2.9	1.45	0.97	2.3	1.15	0.77
排料量与原排料量比	1.29			1.22		1.19

脱硫反应后对固体颗粒而言, 不管是粒径增大、颗粒密度增加还是引起固体浓度增加, 就一般旋风分离器分离效率都是增加的^[5], 因此从物料平衡的角度脱硫反应会使维持平衡更容易, 而此时排料量则需相应按比例增加。从表2看出, 随 Ca/S, 循环倍率的增加, 脱硫反应的影响减少。由以上分析可知, 即使存在脱硫反应, 只要分离器的性能与所选定的循环倍率匹配, 并按一定比例增加排出系统的物料, 脱硫反应的循环流化床就完全可以维持系统的物料平衡。事实上, 由于所反应产物的颗粒尺寸较小, 所以 δ 可能比较大。

实际上由于循环流化床对固体物料的“淘洗”作用, 要建立质量平衡, 也需要一定时间。

3 化学成份的变化

以上分析表明, 对于循环流化床这样一个开口体系, 要维持床内物料的质量平衡, 主要取决于分离器的性能。而在脱硫反应中, 由于反应条件改变所引起的床内物料成份的变化却要复杂得多^[6]。

为了分析亚硫酸钙的变化规律, 假定:

- (1) 床料的成份为: 灰中的惰性物质、反应剩余的 CaO、反应生成的亚硫酸钙 $CaSO_3$;
- (2) 加入的 CaO 及生成的亚硫酸钙与床料混合均匀, 亦即单位时间排出系统的床料成份均匀;
- (3) 亚硫酸钙瞬间生成。

用 m 表示床内固体物料总质量(kg), m_s 为加入的固体物料及生成的亚硫酸钙量(kg), 而 N_{sul}^* 表示单位时间亚硫酸钙生成率(kg/s), C_{sul}^0 则为起始时床内亚硫酸钙含量, C 为某时刻系统亚硫酸钙的含量, 那么对系统而言就有如下关系式,

$$m \frac{dC}{dt} = -Cm_s + N_{sul}^* \quad (4)$$

式中, 等式左边为系统亚硫酸钙总量随时间的变化, $-Cm_s$ 为单位时间离开系统的亚硫酸盐, N_{sul}^* 为单位时间亚硫酸盐的生成量, 解式(4)可得,

$$C = \frac{C_{sul}^0}{e^{\frac{m_s}{m}t}} + \frac{N_{sul}^*}{m_s} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{m_s}{m}t}} \right) \quad (5)$$

如果要达到绝对平衡, 则 $t \rightarrow \infty$, 此时,

$$C_\infty = N_{sul}^* / m_s \quad (6)$$

由以上分析可以看出, 要实现不同工况之间转换后的绝对平衡是很困难的, 只能在其接近平衡浓度时不再考虑其影响。于是, 可由下面的公式近似得出达某一中间浓度所需的时间。

$$t = \frac{m}{m_s} \cdot \ln \left[\frac{C_\infty - C_{sul}^0}{C_\infty - C} \right] \quad (7)$$

同理, 若假定运行中的钙硫比为 r , 脱硫效率为 η_s , 床料中 CaO 的初始含量为 C_{ca}^0 , 则由式(2)的质量关系并考虑钙硫比与脱硫效率可得出床料中 CaO 含量随时间的变化为:

$$C_{ca} = \frac{C_{ca}^0}{e^{\frac{m_s}{m}t}} + \frac{7}{15} \cdot \left(\frac{100r}{\eta_s} - 1 \right) \cdot \frac{N_{sul}^*}{m_s} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{m_s}{m}t}} \right) \quad (8)$$

其平衡含量为, $t \rightarrow \infty$

$$C_{ca\infty} = \frac{7}{15} \cdot \left(\frac{100r}{\eta_s} - 1 \right) \cdot \frac{N_{sul}^*}{m_s} \quad (9)$$

达到某一中间浓度所需的时间,

$$t = \frac{m}{m_s} \cdot \ln \left[\frac{C_\infty - C_{ca}^0}{C_\infty - C} \right]$$

如果一个反应系统 m_s 为 1 kg/s, 循环倍率为 20, 那么系统的物料量 m 应在 100 kg 以上, 并假定初始亚硫酸钙和 CaO 的含量均为零, 由式(10)可粗略计算出亚硫酸钙和 CaO 达到与平衡浓度的不同比值所需时间, 见表 3。

表 3 亚硫酸钙和 CaO 达到某一中间浓度所需时间(初始浓度均为零)

所达平衡浓度的百分比 / %	70	80	90	95	99
所需时间 / s	120	161	230	300	460

事实上, 在动态过程中, 亚硫酸钙的生成率 N_{sub}^* 和脱硫效率 η_s 不是常数, 一个脱硫反应所生成的固体物也不可能瞬间反应在系统中混合均匀, 因此实际过程中所需要的时间比计算值长, 对实际过程上述计算结果还需进行修正。

4 结论

(1) 只要分离器的效率与设计的循环倍率相匹配, 循环流化床脱硫反应器内固体床料就可以达到质量平衡;

(2) 当有脱硫反应存在时, 只要按脱硫产物的生成量增加一定比例的排料就能维持系统质量平衡;

(3) 循环流化床脱硫反应器内固体床料的化学成分在稳定状态下是平衡的。当工况发生变化时, 床料中亚硫酸钙及 CaO 的含量的变化是一个动态过程, 过渡到某一中间状态的时间与床料的总质量、加入的固体物料、初始亚硫酸钙及 CaO 的含量、脱硫效率及亚硫酸钙的生成率有关。

参考文献:

- [1] 苏红梅. 循环流化床锅炉的模型化分法[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1991.
- [2] 李政. 循环流化床锅炉通用整体数学模型、仿真与性能预测[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1994.
- [3] GU Y P, NIU C S, XU J Y. The establishment of circulating-rate of CFB boiler and its influences upon the combustion[A]. In: Xu X C, Zhou L X, eds. Proceedings of the 3rd International Symposium on Coal Combustion[C]. Beijing: Science Press, 1995. 399~403.
- [4] 岑可法. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 谭天, 梁凤珍. 工业通风除尘技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [6] 樊保国. 循环流化床烟气脱硫技术的实验研究[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1996.

(孙显辉 编辑)

(上接第 330 页)

开发利用中将发挥重要的作用, 它必将促进我国能源利用率的提高和环境保护的全面发展。

*文中的立方米均为标准立方米

参考文献:

- [1] 周怀春. 高温空气燃烧技术——21世纪关键技术之一[J]. 工业炉, 1998(1): 19-27.
- [2] 于娟, 施伯红, 宋玉宝, 等. 低 NO_x 燃烧技术对填充球蓄热室传热性能的影响[J]. 工业加热, 2000(2): 8-11.
- [3] 祁海鹰, 徐旭常. 中国开发应用高温空气燃烧技术的前景[A]. 高温空气燃烧新技术讲座[C]. 北京: 中国科学技术协会工程学会, 1999, 10: 192-205.
- [4] 萧泽强, 蒋绍坚, 周子卫, 等. 高温低氧空气燃烧过程试验研究和数据计算[A]. 高温空气燃烧新技术讲座[C]. 北京: 中国科学技术协会工程学会, 1999, 10: 116-137.
- [5] MASASHI KATSUKI, TOSHIKI HASEGAWA, The science and technology of combustion in highly preheated air[A]. 27th Symposium

(Internation) on Combustion[C]. Pittsburgh: the Combustion Institute 1998, 3135-3146.

- [6] JIANWEI YUAN, ICHIRO NARUSE. Effects of air dilution on highly preheated air combustion in a regenerative furnace[J]. **Energy & Fuels** 1999, 13(1): 99-104.
- [7] GUPTA A K, BOLZ S, HASEGAWA T. Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission[J]. **J of Energy Resources Technology**, 1999(9): 209-216.
- [8] 栗原孝好, 仲町一郎. FDI リゾエネレイテイブバーナの開発[J]. 工业加热, 1996 33(5): 39-47.
- [9] DR-ING, JOACHIM. Bumer design for flameless oxidation with low NO -formation even at maximum air preheat[J]. **Industrial Heating**, 1995(1): 24-28.
- [10] 田中良一, 森田光宣. 高性能工业炉开发プロジェクトの現状と今後の方向[J]. 工业加热, 1997, 34(1): 15-27.
- [11] 须藤 淳 多田 健. 蜂窝型蓄热式燃烧系统的开发和应用[J]. 工业炉, 1999 21(2): 50-53.

(辉 编辑)

automatic increase in hidden nodes has been employed to predict nonlinear time series. The proposed method allows to successfully tackle the problem of selecting local minimal hidden node number and excessive fitting in BP networks. It has been applied to predict the thermal loads of a thermal power plant. The results of prediction indicate that very satisfactory results have been achieved in forecasting the thermal loads of power plants. **Key words:** nonlinear time series, prediction, RBF (radial base function) neural network, thermal load

面向对象方法与转子故障监测诊断系统的开发 = **Description of an Object-orientated Methodology and Development of a Rotor Failure Monitoring/ diagnosis System** [刊, 汉] / ZHANG Heng-liang, ZHANG Qin, CHEN Ru-qing (Power Engineering Department, Wuhan University of Water Resources and Electric Power, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 313 ~ 315

In recent years there existed some problems of poor self-stability and certain difficulties involved in the maintenance and upgrading of rotor-failure monitoring and diagnostic systems during their use in industrial fields. The proposed object-orientated method represents a good software development approach, which has been assessed as a major method for use in a software development process. The present paper gives a brief description of the method, highlighting how to use such a method to develop a rotor failure monitoring and diagnostic system. **Key words:** monitoring and diagnostic system, object-orientated methodology, rotor failure monitoring

流体流动的输出功率与功率耗散的协调优化 = **Optimized Coordination of Fluid-flow Output-Power and Power Dissipation** [刊, 汉] / YAN Ning-rong (Department of Mechanical Engineering, Lujiang University, Xiamen, Fujian Province, China, Post Code: 361005) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 316 ~ 318

Ecological optimization criteria have been popularized for use in the analysis of the optimized performance of a fluid-flow work-doing unit. Some new performance parameters were derived and discussed in a meaningful way. Expounded further was the major significance of the ecological optimization criteria. The conclusions obtained may serve as new theoretical guidelines for the optimized design and selection of optimized working conditions for fluid-flow work-doing units. **Key words:** fluid-flow work-doing device, ecological optimization criteria, optimized performance

循环流化床烟气脱硫床料的质量平衡和化学成份的变化 = **Mass Equilibrium of Gas Desulfurization Bed Materials in a Circulating Fluidized Bed and the Variation of Chemical Composition** [刊, 汉] / FAN Bao-guo, QI Hai-ying, YOU Chang-fu, et al (National Key Lab of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 319 ~ 321

A theoretical analysis was conducted of the variation of bed materials mass and chemical composition in the desulfurization process in a circulating fluidized bed. It has been found that with the circulation ratio selected at 5-50 and the effectiveness of a separator attaining 83%~98% it is possible to maintain a mass equilibrium in the bed. In case a change of operating parameters gives rise to a change of mass of in-bed materials, it is possible through a quantitative change of bed materials leaving the bed to attain equilibrium very rapidly. By contrast, the dynamic state of chemical composition is unbalanced. Its transition process has been found to be dependent on bed material quantity in the bed, production rate of reaction products and the variation range of related parameters, etc. **Key words:** circulating fluidized bed, gas desulfurization, bed materials mass and chemical composition

利用双节流元件测量两相流干度 = **The Measurement of Two-phase Flow Dryness by the Use of a Dual-throttle Element** [刊, 汉] / YE Qiang, CHEN Ting-kuan, LUO Yu-shan (National Key Lab of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 322 ~ 324

Based on a model of classical uniform-phase flow and divided-phase flow the authors have deduced a formula for the direct measurement of dual-phase flow under an ideal condition. The applicable scope of usage of the formula is analyzed. An experimental device has been designed, which incorporates a horizontal orifice plate and a vertical descending Venturi