

循环流化床的物料平衡和运行中的物理现象

马素霞, 王明敏, 岳光溪

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 循环流化床中的物料平衡是循环床燃烧的核心和基础, 对于循环床的运行很重要。本文给出了循环流化床稳态下的物料平衡模型, 讨论了影响物料平衡的因素, 采用该模型计算了 75 t/h 循环流化床锅炉的循环物料流率、排渣物料流率和飞灰物料流率及其粒度分布, 并分析了在物料平衡影响下的循环流化床运行中的物理现象和问题的内在原因, 如“床质量”和循环床用分离器特性等, 量化说明了理论界和工业界存在的一些问题。

关 键 词: 循环流化床; 物料平衡; 模型; 物理现象

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

1 引 言

循环流化床锅炉燃烧技术自 20 世纪 80 年代开始迅速发展, 目前已经进入全面商业化阶段, 然而无论在国外还是国内, 有关循环床设计基本理论的研究均很少报导。因此, 至今为止, 在理论界和工业界均存在一些极为混乱的概念, 特别是有关循环流化床物料平衡方面的错误概念较多。而循环流化床物料平衡又是循环流化床燃烧的核心和基础, 它影响到循环流化床运行特性, 因此, 明确循环流化床物料平衡的概念, 建立基本物料平衡模型, 利用基本模型说明循环流化床运行中的现象和问题的内在原因是国内循环流化床理论界和工程界所急需的。

2 循环流化床物料平衡及影响因素

循环流化床锅炉是由一个燃煤成灰或脱硫用石灰石连续进料, 床底及分离器排料的宽筛分平衡系统。早在 1992 年, 已有研究者定义了循环流化床是一个“一进二出”物料平衡系统, 并借用 Wen-chen 扬析夹带模型建立物料平衡, 由此导出了该系统存在一个综合分离效率。本文对循环物料平衡系统作进

一步分析。

2.1 循环流化床物料系统

循环流化床物料系统是一个开口体系, 如图 1 所示。如果忽略物料在体系内的磨损粒径变化, 则该系统在稳定下, 不仅满足总质量进出平衡, 而且满足每个粒径物料的质量平衡。

2.2 简化物料平衡模型

假定密相区内, 粒度为 i 的颗粒所占组分为 $x(i)$, 在燃烧室运输分离高度 TDH 以上, i 粒径粒子的饱和夹带率可以按下述模型^[1] 计算:

$$E_{\infty}(i) = 23.7 \rho_g u_0 \exp(-5.4 \frac{u_1(i)}{u_0})$$

$$u_1(i) < u_0 \quad E_{\infty}(i) = 0 \quad u_1(i) \geq u_0$$

式中: u_0 —空床风速; $u_1(i)$ — i 粒径粒子的自由沉降速度由于密相区是由多颗粒粒子组成, 因此 TDH 以上夹带物料流亦是按相同粒径比例的复合物料流:

$$E_{\infty} = \sum E_{\infty}(i)x(i)$$

假定床截面为 A , 分离器的分率效率为 $\eta(i)$, 则分离器出口逃逸颗粒流率为:

$$\sum E_{\infty}(i)x(i)(1-\eta(i))A = \sum F(i)$$

而从床底排出的物料粒度分布可简化假设与密相床物料粒度分布一致:

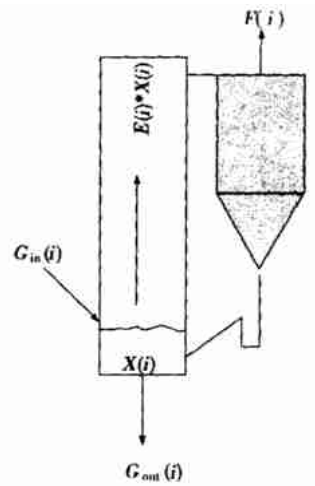


图 1 循环床“一进二出”物料系统

$$G_{out}(i) = G_{out}x(i)$$

在稳定状态下, 循环床物料平衡系统应满足各粒度的平衡:

$$G_{in}(i) = G_{out}(i) + F(i)$$

且有: $\sum x(i) = 1$

无论粒度分成多少档, 上述方程组均封闭, 有唯一解。

2.3 物料平衡的影响因素

循环流化床物料来自外添加床料, 如起动用床料、脱硫用石灰石和燃煤形成的灰渣。起动用床料的输入是暂时性的, 对于连续运行的流化床稳定物料平衡没有影响; 而燃煤形成的灰流及脱硫石灰石流是稳定输入物料流, 他们与燃烧室流化风速, 分离器分级分离特性和排渣分层特性^[5]共同决定了系统的物料平衡特性, 当然物料的磨耗特性也有重要影响^[2-3]。

有关循环流化床内的燃煤成灰粒度特性, 清华大学已有深入研究^[4]。研究发现, 该组分灰粒子, 经过一个快速磨耗期(一般不超过 10 min)即可进入稳定磨耗期, 其粒度随时间变化相对较少。此时的灰粒子粒度分布, 可称为本征成灰特性或本征粒度分布, 并考虑到输入石灰石的粒度, 合并在一起可以作为循环床物料平衡系统的物料输入特性, 如图 2 所示。

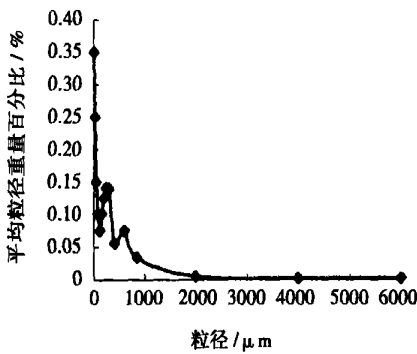


图 2 物料输入特性

3 物料平衡计算

上述模型可以计算出稳定平衡状态下给定输入物料时的循环物料流率、分离器出口的逃逸物料流率、下排渣物料流率及它们各自的粒度分布和床料粒度分布。在应用意义上, 本模型计算预测的趋势已经足以说明循环流化床内的物料平衡和在物料平

衡影响下的其他物理现象。需要说明的是模型计算给出的循环物料流率并不是绝对值。

例如, 1 台 75 t/h 的循环流化床锅炉, 不加石灰石脱硫, 床截面为 18 m², 燃煤满负荷运行时相当于输入灰份 4 t/h, 给定灰份粒度分布, 设球形度为 0.6, 燃烧室风速为 5 m/s(热态), 温度为 900 °C, 分离器 $d_{50} = 35 \mu\text{m}$, $d_{99} = 150 \mu\text{m}$ 。

计算结果: 循环物料量 214.91 t/h, 飞灰量 1.05 t/h, 排渣量 2.95 t/h, 各粒度分布如图 3 所示。

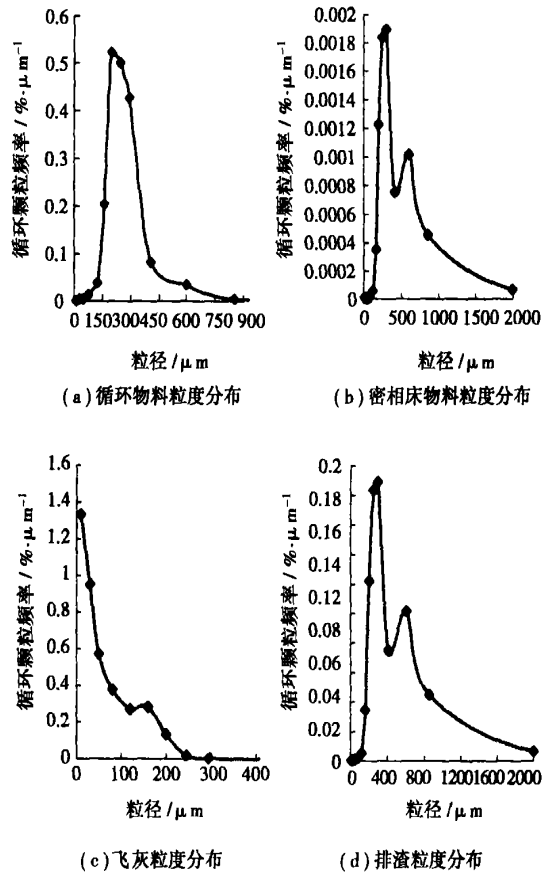


图 3 粒度分布

4 循环床运行中的物理现象

循环流化床物料平衡是循环流化床燃烧的核心和基础, 它影响到循环流化床的运行特性, 应用上述物料平衡模型可以解释和分析在物料平衡影响下的循环流化床运行中的物理现象和问题的内在原因, 如: “床质量”和“循环床分离器特性”等。

4.1 “床质量”

“bed quality”指床料平均粒径, 所谓质量高是指

平均粒度较细。经验证明普通鼓泡床燃烧锅炉的床料平均粒度为 1~2 mm, 而循环床床料平均粒度最多为 300 μm。事实上, 燃煤鼓泡床和循环床给煤成灰特性并没有大差别, 之所以床料粒度差别大, 是由于循环流化床一进二出物料平衡系统选择性保留细物料的结果, 也是循环流化床具有高的“床质量”、大的循环物料量。用上述循环流化床物料平衡模型就可以清楚地计算出稳态时密相床物料的粒度分布(见图 3)。

当床质量变化时, 对流化床燃烧会造成什么影响, 可以用两个极端情况加以说明。对于低流化速度运行的鼓泡床, 平均物料粒度为 1~2 mm, 该颗粒的终端沉降速度大于流化风速, 夹带物料流率仅是每标米立方烟气携带十克左右, 仅是极细的物料被带出燃烧室, 燃烧份额集中于密相区。因此, 必须在密相区内布置冷却埋管以吸收热量, 使之能在规定的 800~900 °C 下运行。

相反, 对于循环流化床, 床料粒度细, 高流化速度下, 细颗粒携带能力加强, 在床内形成了很大的物料循环量(达到每标米立方烟气公斤级携带率)。由于平均粒度细, 因此密相区气泡形成完整, 长大迅速, 在密相区表面形成爆炸, 气泡相和乳化相之间传质减弱⁶⁾, 乳化相处于欠氧状态, 其中的碳粒不能充分燃烧, 同时一部分 CO 和挥发份被带到悬浮段燃烧, 密相区燃烧份额大幅度下降, 向上部转移, 并且由于上下固体质交换的加强平衡了燃烧室上下的热量分配, 因此, 密相区内不需要也不能加埋管吸热。

归根结底, 只要测一测床平均粒度, 确认床质量, 即可初步判断其运行状态。

4.2 循环床用分离器的基本特性

循环流化床需要高“床质量”及相应的大循环物料量, 作为物料平衡系统的核心装置——分离器的性能对循环床的物料平衡就极为重要。

评价分离器性能的好坏, 经常用到分级分离效率、切割粒径和临界粒径的概念, 分级分离效率 $\eta_i(dp)$ 表示粒径 dp 的分离程度, 对应于分级分离效率 $\eta_i(dp) = 50\%$ 的粒径称为切割粒径 d_{50} , 分级分离效率 $\eta_i(dp) = 100\%$ 的粒径称为临界粒径 d_{100} , 有时也把 $\eta_i(dp) = 99\%$ 的粒径定义为临界(或截止)粒径 d_{99} 。计算 75 t/h 循环床物料平衡在仅改变某一粒径(如 150 μm)的 d_{99} 为 d_{999} 或 d_{9999} 下, 通过循环量的变化就可说明 d_{99} 是循环床用分离器的关键指标, 对于分离器的截止粒径点, 截止得越彻底(即效

率越接近 100%), 则循环次数越多, 循环量越大。相反切割粒径 d_{50} 的变化对循环量的影响甚小, 如图 4 所示: $d_{99} = 180 \mu\text{m}$; $d_{50} = 40 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}$ 。

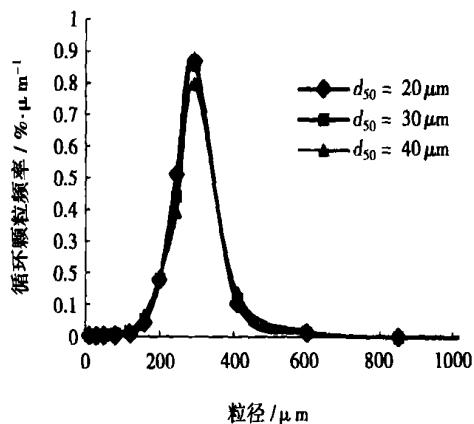


图 4 不同 d_{50} 所对应的循环物料粒度分布

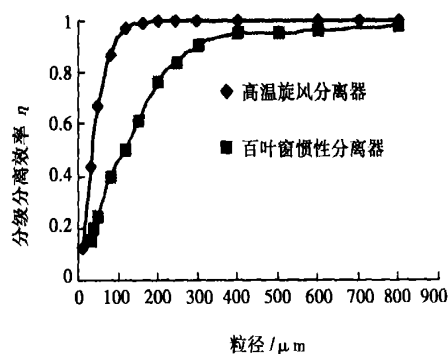


图 5 两种类型分离器的分离效率

分析不同类型的分离器, 有些适合作为循环床分离器, 有些则不能。以离心力为主要分离机制的圆旋风筒、方旋风筒, 它们的分离效率曲线存在一个清晰的 100% 分离粒径, 仅是粒径略有不同, 因此, 两类旋风筒构成的循环床均可以达到所需的循环量。另一类分离器即惯性分离器, 如百叶窗, U 型, 平面流等, 在国内我们常称之为二维分离器, 从锅炉结构上看, 二维分离器对循环床锅炉紧凑化和其他炉型改造极为有利, 然而惯性分离器的分离特性基本上都是: (1) 切割粒径 d_{50} 通常比旋风分离器的高(平面流惯性分离器的切割粒径 d_{50} 和旋风筒的差不多); (2) 截止粒径 d_{99} 的范围大, 在可夹带粒径范围内很难找到 100% 分离点(如图 5 所示)。这种分离器用在循环流化床上则无法达到大循环量, 床质量

类似鼓泡床, 锅炉负荷上不去, 这是早期中国循环流化床的通病。

曾经有许多针对二维分离器循环流化床的改进措施, 以维持循环床内的物料平衡, 例如提高燃烧室风速以提高夹带能力、增加多级分离器、用多个并联高效小分离器代替一个大分离器等, 运用前述循环物料平衡原理可以判断以上改进措施的有效性。如图 6 所示, 分离器效率低, 加大燃烧室风速, 可使循环量达到要求。必须要说明的是, 在防止严重磨损的有限风速范围内, 提高风速带来的夹带粒径的提高还不足以使该粒径进入二级分离的截止粒径的范围, 因此, 该措施还未见有成功的报导。

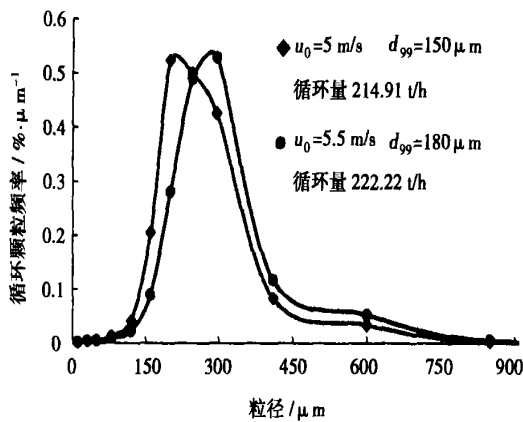


图 6 提高燃烧室风速改变夹带能力

采用多级分离以补偿一级分离的不足, 的确是有效的改进措施, 然而增加的分离器必须保证在有效夹带粒径上有极高的分离效率。

运用多个高效小分离器代替一个分离器看起来可以提高分离效率, 但是只要多个旋风筒中任意一个发生故障时, 则会使总分离效率在任何一个粒径

上均达不到 100%, 这一点是致命的问题, 何况多个并联旋风筒其结构之复杂使其效率大打折扣, 也不适合于大型燃煤系统。

5 结 论

(1) 给出了循环流化床稳态下的物料平衡模型, 利用该物料平衡模型可以预测循环床锅炉的循环物料流率、排渣物料流率、飞灰物料流率及其粒度分布;

(2) 讨论了燃烧室风速和分离器分级分离特性对物料平衡的影响, 运用该物料平衡模型可分析解释循环床运行中在物料平衡影响下的物理现象和问题的内在原因, 如“床质量”和分离器分离特性等, 量化说明了工业界存在的一些问题。

参考文献:

- [1] GELDART D, CULLINAN J, GEORGCHIADES S. *et al.* The effect of fines on entrainment from gas fluidized beds[J]. *Trans Inst Chem Engrs*, 1979, 57: 269—275.
- [2] 吕俊复, 岳光溪. 水冷异型分离循环流化床燃烧技术[J]. *洁净煤技术*, 1998, 4: 31—35.
- [3] 吕俊复, 金晓钟. 75 t/h 水冷方型分离器循环流化床锅炉物料平衡热态测试[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, 5: 7—10.
- [4] 刘宝森, 吕俊复. 循环流化床锅炉对煤种的适应性及灰平衡与煤种的关系[J]. *电站系统工程*, 2000, 2: 71—74.
- [5] YUE GUANGXI, LIU ZHAN, ZHANG XUYI, *et al.* Classified ash drainage in CFBB-theory and practice[A]. *Proceeding of the 2nd International Symposium on Coal Combustion*[C]. China: Beijing, 1991. 7—10.
- [6] 吕俊复, 金晓钟. 两相流动对流化床燃烧行为的影响[J]. *热能动力工程*, 2000, 15(3): 217—219 238.

欢迎投稿, 欢迎订阅!

Key words: boiling tube, CFX, throttling element

转子蜂窝密封封严特性的试验研究 = **Experimental Investigation of the Sealing Characteristics of a Rotor Honeycomb Seal** [刊, 汉] / WANG Xu, ZHANG Wen-ping (Nuclear and Power Engineering Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Sheng-yuan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 521 ~ 525

To study the sealing characteristics of a rotor honeycomb seal, five kinds of stator test piece for honeycomb seals and five kinds of rotor test piece were designed and fabricated. Tests were carried out on a rotor seal test rig to identify the impact on sealing characteristics of such factors as honeycomb core lattice size, seal clearance, rotor speed, honeycomb depth, and seal pressure ratio. Contrast tests were also conducted of the sealing characteristics of a seal structure composed of a honeycomb stator, labyrinth disc and smooth disc. Finally, the conclusions of the experimental study were presented.

Key words: rotor, honeycomb seal, labyrinth seal, sealing characteristics

五孔探针实验数据处理的线性插值法 = **Linear Interpolation Method for Processing the Test Data of Five-hole Probes** [刊, 汉] / YUE Guo-qiang, Han Wan-jin, Lu Wen-cai, et al (Institute of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 526 ~ 529

During the calibration of data by using five-hole probes a spline interpolation and least square fit are generally employed. For the calibration of curves by the use of identical probes the results of interpolation obtained by employing respectively the above-mentioned two methods may be quite different. Through a theoretical analysis of these two methods the authors have come up with a linear interpolation method, which is more practical for general use. For probes with good characteristics the recommended method can attain a precision close to that of the spline interpolation. As for probes with relatively poor characteristics the above method is capable of ensuring interpolation precision without the change of the probe characteristics, and relative to the spline interpolation and least square fit it enjoys a higher degree of adaptability. **Key words:** five-hole probe, linear interpolation, spline interpolation, least square method

循环流化床的物料平衡和运行中的物理现象 = **Mass Balance of a Circulating Fluidized Bed and Physical Phenomena Encountered in the Latter's Operation** [刊, 汉] / MA Su-xia, WANG Ming-min, YUE Guang-xi (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 530 ~ 533

Mass balance in a fluidized bed constitutes the core and basis of the combustion process in a circulating fluidized bed and is of utmost importance to the operation of the fluidized bed. A mass balance model is presented for a circulating fluidized bed in its steady state along with a discussion of various factors liable to influence the mass balance. The mass balance model was used to calculate the circulating mass flow rate, residue mass flow rate and fly ash flow rate (including its particle distribution) of a 75t/h circulating fluidized bed boiler. An analysis was conducted of the intrinsic causes of the physical phenomena and problems encountered in the operation of the fluidized bed boiler under the influence of the mass balance. Such phenomena include “bed quality” and the characteristics of the separator used for the circulating bed, etc. Some existing problems currently attracting the attention of a circle of theoretical and industrial workers are quantitatively explained. **Key words:** circulating fluidized bed, mass balance, model, physical phenomena

余热锅炉补燃装置的研究 = **A Study of the Supplementary-firing Burner Unit for a Heat Recovery Steam Generator** [刊, 汉] / YU Zhao-yang (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046), WANG Jian-zhi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HE Nian (Equipment Engineering Depart-