

# 循环流化床锅炉热惯性分析

李金晶, 李 燕, 吕俊复, 岳光溪

(清华大学热能工程系热能动力工程与热科学教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 循环流化床锅炉的热惯性是影响锅炉动态特性的重要因素。从动态能量平衡的角度定义了循环流化床锅炉的热惯性。分别针对 6 种不同容量等级的锅炉计算了其能量传递各环节的热惯性大小。计算结果表明: 锅炉总热惯性的大小随锅炉容量的增大而增加, 但单位蒸发量却随锅炉容量的增大而减小; 工质和耐火材料热惯性是能量传递过程中的控制环节; 对于省煤器而言, 金属热惯性与工质热惯性同等重要; 过/再热器中耐火材料与金属热惯性处于相同量级; 水冷壁/屏中, 工质热惯性最大。

**关 键 词:** 循环流化床锅炉; 传热; 热惯性; 动态特性

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

## 引 言

循环流化床(CFB)锅炉是将燃料中的化学能转化为蒸汽内能的装置, 其能量传递的过程如图 1 所示。锅炉的动态特性实际上是主蒸汽参数(工质内能)对操作参数扰动的响应特性, 因此能量传递各环节的蓄热能力大小代表了其热惯性的大小。在循环流化床大型化过程中, 随着锅炉容量的变化各环节的热惯性在整个能量传递链中所占的比例也相应发生变化。明确各环节在能量传递过程中影响的大小, 有助于把握住能量传递过程中的主要因素, 对于循环流化床锅炉动态特性的研究, 特别是对动态过程的建模具有指导意义。

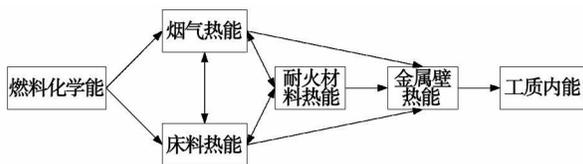


图 1 循环流化床锅炉内能量传递环节

早期煤粉锅炉的模型研究中, 由于煤粉和烟气

在炉膛内停留时间很短(一般为 2~4 s), 因此往往忽略煤粉的燃烧惯性和烟气的热惯性, 在动态建模时将炉膛视为一个具有集总参数的整体处理<sup>[1]</sup>。而对于循环流化床而言, 循环流化床炉膛中的燃烧惯性和床料热惯性都不能被忽视, 必须在模型中加以描述<sup>[2~3]</sup>。以炉膛为例, 如果将其视为一个整体, 则动态能量平衡方程可以写成如下形式。

炉侧:

$$(M_s \cdot c_s + M_g \cdot c_g) \frac{dT_b}{dt} = \sum H_{in} - \sum H_{out} + \sum Q_r - \sum Q_a - Q_t \quad (1)$$

工质侧:

$$(M_w \cdot c_w + M_f \cdot c_f) \frac{dT_w}{dt} = \sum W_{f, in} \cdot h_{f, in} - \sum W_{f, out} \cdot h_{f, out} + Q_t \quad (2)$$

式中:  $M_s$ 、 $M_g$ 、 $M_w$  和  $M_f$ —固体(包括床料和受热面表面的耐火材料)、烟气、受热面金属和工质的质量, kg;  $c_s$ 、 $c_g$ 、 $c_w$  和  $c_f$ —固体、烟气、受热面金属和工质的比热容, J/(kg·K);  $\frac{dT_b}{dt}$  和  $\frac{dT_w}{dt}$ —床温和受热面金属温度的变化速率, K/s;  $\sum H_{in}$  和  $\sum H_{out}$ —单位时间流入和流出的烟气及床料的总物理焓, J/s;  $\sum Q_r$  和  $\sum Q_a$ —化学反应放热和吸热的速率, J/s;  $Q_t$ —受热面的吸热量, J/s;  $W_{f, in}$  和  $W_{f, out}$ —流入和流出的工质流率, kg/s;  $h_{f, in}$  和  $h_{f, out}$ —流入工质比焓和流出工质比焓, J/kg。方程左侧括号内各项是由 CFB 锅炉本身材料的物性决定的, 并不随操作工况的改变而发生变化, 其大小直接影响到热力参数的变化速率  $dT_b/dt$  和  $dT_w/dt$ , 即锅炉的动态特性, 因此可用质量与比热容的乘积  $M_i \cdot c_i$  来表征 CFB 锅炉中能量传递各环节的热惯性, J/kg。下角标  $i$  代表不同材料,  $s$  包括床料和耐火材料;  $g$  为烟气;  $w$  为受热面金属;  $f$  为受热面内工质。

收稿日期: 2008-08-28; 修订日期: 2008-12-07

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划基金资助项目(2006BAA03B00)

作者简介: 李金晶(1983-)男, 贵州遵义人, 清华大学博士研究生

## 1 计算方法

按照热惯性的定义, 分别对典型的 75, 130, 220, 440, 670 和 1 025 t/h 等 6 个容量等级的同类型 CFB 锅炉热惯性进行定量估算。锅炉均为高温绝热旋风筒筒型布置, 按照锅炉的 100% 负荷工况计算。

### 1.1 床料热惯性

CFB 锅炉与常规的煤粉炉的一个很大区别在于其床料循环系统中存在大量的循环物料量, 这些循环物料对保证 CFB 锅炉中的流态、传热性能和燃烧份额分配具有重要意义<sup>[4]</sup>。由于床料本身的质量不容忽视, 因此其热容应该在能量传递过程中予以考虑。由于所计算的 CFB 锅炉均为单炉膛结构, 不带外置换热床, 因此计算中主要考虑了炉膛、分离器、分离器后立管及返料阀中的存料量, 床料热惯性即存料量与床料比热容的乘积。

炉膛内的存料量主要表征参数为炉内床压降, 计算中忽略加速压降和摩擦压降, 则炉膛内存料量与炉膛内床压降的关系为:

$$M_s = \int_0^H A_F \cdot dp / g \quad (3)$$

式中:  $H$ —炉膛高度, m;  $dp$ —炉膛内高度方向上的床压降, Pa, 计算中炉膛总床压降取现场运行平均值, 如表 1 所示;  $A_F$  为炉膛截面积,  $m^2$ ;  $g$ —重力加速度,  $9.8 \text{ kg} \cdot m/s^2$ 。

表 1 各容量锅炉典型的运行床压降

锅炉容量/ $t \cdot h^{-1}$	炉内床压降/kPa
1 025	10.5
670	10.5
440	9.0
220	7.4
130	6.2
75	5.1

分离器内的存料量与固体物料循环流率和分离器内固体颗粒的停留时间有关。由于炉膛高度在 20 m 以上, 可以认为细颗粒处于气力输送状态, 固体循环流率按下式估算:

$$G_s = \rho_s (1 - \epsilon) U_g A_{FE} \quad (4)$$

式中,  $\rho_s (1 - \epsilon)$ —炉膛出口物料浓度, 计算中统一按  $1.5 \text{ kg}/m^3$  计;  $U_g$ —炉膛出口气体流速,  $m/s$ ;  $A_{FE}$ —炉膛出口截面积,  $m^2$ 。

分离器内固体颗粒的停留时间估算则采用

Kang 等人提出的拟合关系式<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_g} = 0.032 Re_p^{0.43} \left( \frac{u_g - u_t}{u_t} \right)^{0.70} \left( \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.42} \times \left( \frac{H}{H-h} \right)^{-1.76} \quad (5)$$

一般认为分离器后立管内的颗粒流动属于移动床<sup>[9]</sup>。实际运行中, 后立管压降表征了后立管内存料量, 故后立管内存料量仍采用下式估算:

$$M_s = A_{SP} \cdot \Delta p / g$$

式中:  $\Delta p$ —分离器后立管压降, Pa, 与主循环系统的压力平衡有关, 计算中统一按炉膛压降的 0.9 倍计, 根据返料口位置不同会略有偏差;  $A_{SP}$ —立管截面积,  $m^2$ 。

返料阀内流动视为鼓泡床流动, 鼓泡床空隙率  $\epsilon_{LS}$  利用 Babu 等人提出的经验关系式估算<sup>[7]</sup>, 则返料阀内存料量为:

$$M_s = (1 - \epsilon_{LS}) \cdot \rho_s \cdot V_{LS} \quad (6)$$

式中:  $\rho_s$ —床料颗粒密度,  $kg/m^3$ ;  $V_{LS}$ —返料阀容积,  $m^3$ 。

鉴于尾部烟道内的固体颗粒浓度很低, 并且受煤种的影响较大, 因此计算中忽略了尾部烟道内固体颗粒的热惯性。

### 1.2 烟气热惯性

虽然 CFB 锅炉炉膛和尾部烟道中存在一定质量的烟气, 但烟气在整个锅炉系统中的停留时间较短(一般在 10 s 量级), 因此建模时通常不考虑烟气的热惯性。为便于与其它环节的热惯性比较, 本文也考虑了烟气产生的热惯性。烟气热惯性的估算方法较为简单。一方面, 按照锅炉结构参数计算出锅炉各部件容积, 再减去床料占据的体积便是烟气的体积; 另一方面, 根据烟气温度可以估算出烟气密度和比热容, 三者的乘积即为烟气的热惯性。

### 1.3 耐火材料热惯性

为防止磨损, CFB 锅炉在炉膛下部高物料浓度区域、炉膛出口区和转向室的膜式壁内表面覆盖有一定厚度的耐火材料, 分离器、料箱腿或料斗腿、回料装置和分离器出口烟道为绝热结构。耐火材料具有相当大的质量(量级比锅炉内床料量更大), 其热惯性不容忽视。在实际运行中, 由于各厂家和用户的习惯差异, 耐火材料涂层的厚度也有所不同, 本文中膜式壁敷设的耐火层厚度统一按照距受热面中心线 0.2 m 估算, 分离器、后立管、返料装置及分离器出口烟道按 0.35 m 估算。

### 1.4 金属受热面热惯性

由于受热面工质侧具有很大的传热系数, 因此在设计计算中为了简便, 一般不单独考虑金属受热面的热惯性, 将金属外壁与工质的温差视为定值。而在动态描述中, 金属受热面材料具有相当大的质量, 其热惯性也不容忽视。计算中受热面平均温度按照工质温度加 20 K 估计, 从而得到金属材料比热容和密度, 金属体积可以由受热面结构参数直接计算, 三者乘积即为受热面金属热惯性。

### 1.5 工质热惯性

以往的动态模型中均认为工质热惯性是锅炉热惯性中重要的一部分, 建模过程中均予以重点考虑, 其中最为关键的问题在于对水冷壁/屏内的汽—液两相流动的正确描述。水冷壁/屏中工质的平均干度为工质循环倍率的倒数。由于水冷壁/屏中工质的传热类型属于相变传热, 因此饱和水的比热容为汽化潜热与饱和蒸汽比热容之和。

## 2 计算结果及讨论

### 2.1 总热惯性与容量的关系

如图 2 所示, 虽然锅炉总热惯性的大小随锅炉容量的增大而增加, 但是单位蒸发量对应的热惯性却是随锅炉容量的增大而减小, 对于蒸发量大于 440 t/h 的循环流化床锅炉, 单位蒸发量对应的热惯性约为 75 t/h 时的 1/3。

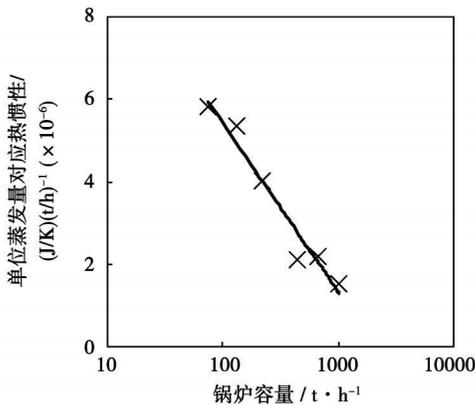


图 2 热惯性与锅炉容量的关系

### 2.2 热惯性比例关系的变化

对于不同类型的受热面, 其传热链热惯性的大小在锅炉总热惯性中所占的比例差异也很大, 如图 3(a)所示。水冷壁/屏的热惯性最大, 占锅炉总热惯性的 90%以上, 并且随锅炉容量的增大呈减小的趋势; 过/再热器受热面和省煤器热惯性处于相同量

级, 在锅炉总热惯性中的比例在 5%以内, 随锅炉容量的增大呈增大的趋势。由此证明, 水冷壁/屏受热面模型是正确描述整个锅炉动态过程的关键, 但随着锅炉容量的增大, 过/再热器受热面和省煤器在锅炉整体动态模型中的重要性也相应增加。

按照图 1 所示的能量传递环节, 将锅炉总热惯性划分为 5 部分, 如图 3(b)所示。在各容量等级的锅炉中, 工质侧的热惯性最大, 约占总热惯性大小的 80%以上, 并且随锅炉容量的增大呈减小的趋势; 其次为耐火材料热惯性, 约占总热惯性大小的 3.5%~11%; 再次为受热面金属热惯性, 约占总热惯性大小的 2.7%~7.6%, 并且耐火材料热惯性和受热面金属热惯性随锅炉容量的增大呈增加的趋势; 第四为床料热惯性, 约占总热惯性大小的 0.16%~1.4%, 并且随锅炉容量的增大呈增加的趋势; 最后为烟气热惯性, 在锅炉总热惯性中的比例在 0.05%以内, 因此图 3(b)中不再标出。

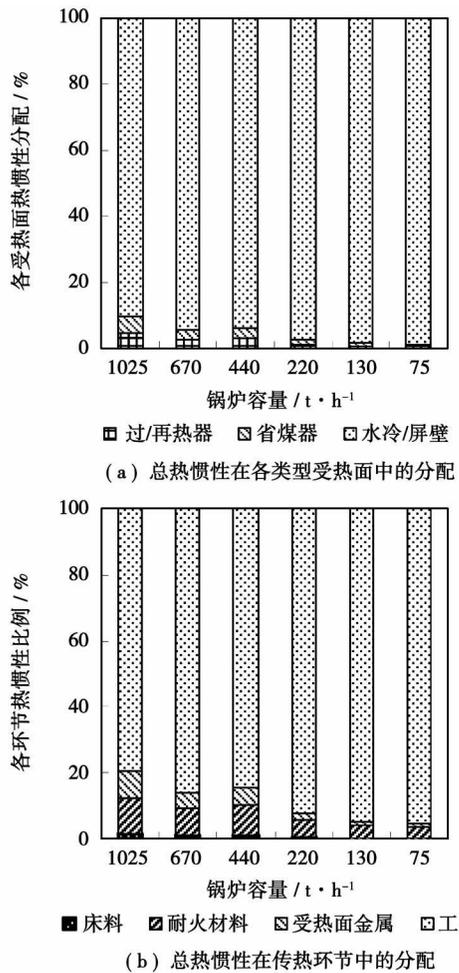


图 3 CFB 锅炉总热惯性分析比例变化

CFB 锅炉中为防止磨损, 敷设了大量的耐火材

料,耐火材料热惯性可以占到总热惯性的 10%,比床料热惯性还大一个数量级左右。因此耐火材料热惯性是床侧动态过程的主导因素,而床料热惯性的影响则相对较小。在建模时,同时考虑耐火材料和床料热惯性有利于更准确地描述锅炉动态过程。烟气热惯性很小,在总热惯性中的比例不足 0.05%,在动态描述中可以忽略。

由于受热面金属热惯性比工质热惯性小一个量级,因此将受热面金属与工质综合考虑,作为一个整体的简化建模方法是合理的。工质热惯性作为锅炉热惯性的主要环节,在各类型受热面中的分配情况如图 4 所示。工质热惯性主要集中在水冷壁/屏中,且主要来自于工质的汽化潜热。

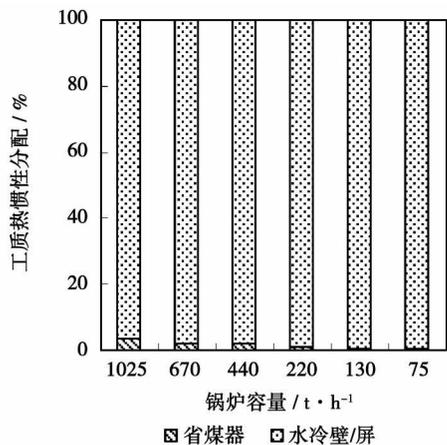


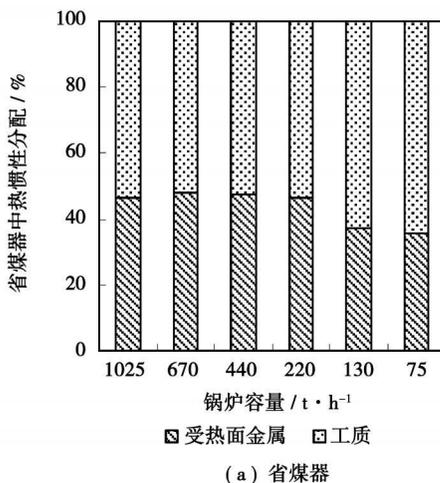
图 4 工质热惯性在各类受热面中的分配

### 2.3 模块化建模中需要注意的热惯性比例关系

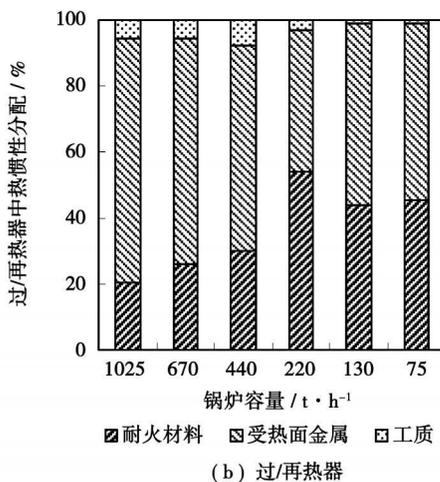
目前针对大型 CFB 锅炉建立动态模型,一般都采用模块化的建模方法<sup>[8]</sup>,即按照烟气、床料和工质流动的特点和物性,将锅炉整体分为一系列独立模块分别建模,模块之间通过质量和能量的交换联系起来,从而描述出锅炉的整体动态特性。根据模块化建模的思想,按照工质状态的变化情况,将锅炉划分为省煤器、水冷壁和水冷屏、包括尾部烟道汽冷包墙的过热器和再热器 3 部分。

对于省煤器而言,能量传递的途径是由烟气的热能转变为工质内能,并且省煤器表面没有耐火材料涂层,因此只须考虑烟气、受热面金属和工质的热惯性,如图 5(a)所示。省煤器工质热惯性与金属热惯性处于同数量级,二者之和约占总热惯性大小的 99.9%;烟气热惯性不足总热惯性大小的 0.1%,可以忽略,故不在图 5(a)中标出。可见,对于省煤器而言,金属热惯性与工质热惯性同等重要,在省煤器建模中对二者作正确描述就足以保证其动态特性描

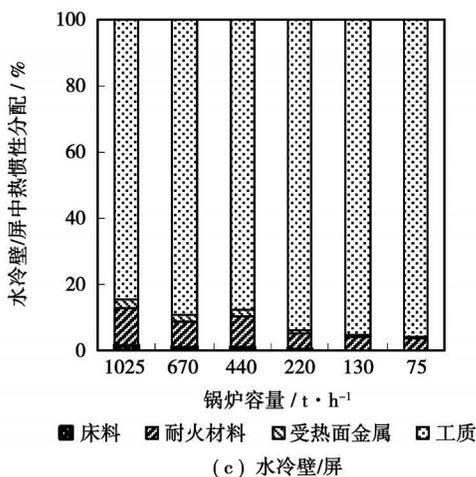
述的准确性。



(a) 省煤器



(b) 过/再热器



(c) 水冷壁/屏

图 5 不同受热面能量传递各环节热惯性比例

除设置在炉膛内的屏式过热器外,过/再热器能量传递途径与省煤器类似,但在转向室表面敷设有耐火材料涂层,如图 5(b)所示。包墙过热器的耐火材料与金属热惯性处于同数量级,二者之和占总热惯性大小的 90%以上;工质热惯性仅占总热惯性大

小的1%~8%,并且随锅炉容量的增大呈增大的趋势;从烟气热惯性不足总热惯性大小的1%,故在图5(b)中未标出。可见,对于过/再热器而言,金属热惯性和耐火材料热惯性要比工质热惯性更为重要,其原因有两方面:一是由于过/再热器中的工质密度较小使得工质总质量相应较小;二是由于过/再热器工质温度较高,为保证强度许用的金属壁厚度较大使得受热面金属质量较大。对于大容量的CFB锅炉,在模块化建模中,宜根据传热情况将过/再热器再细分为炉膛内受热面和对流受热面;另外,由于转向室内有耐火材料,宜对转向室的汽冷包墙单独建模。

水冷壁/屏受热面的传热情况最为复杂,如图5(c)所示。工质热惯性约占总热惯性大小的85%以上,为整个水冷壁/屏能量传递过程中的主要因素;耐火材料热惯性约占总热惯性大小的3%~11%,为炉侧能量传递过程中的主要因素;受热面金属热惯性约占总热惯性大小的0.5%~2.3%,床料热惯性约占总热惯性大小的0.2%~1.5%,并随锅炉容量的增大呈增大的趋势,但均为次要因素;烟气热惯性不足总热惯性大小的0.05%,是可以忽略的环节,故图5(c)中未标出。

### 3 结 论

通过定量计算CFB锅炉能量传递过程中各环节的热惯性,明确了各类受热面和各个环节的比例分配关系。现将计算结果总结如下:

(1) CFB锅炉总热惯性的大小随锅炉容量的增大而增加;工质和耐火材料热惯性是能量传递过程中的控制因素,是正确描述锅炉动态过程的关键。耐火材料热惯性可以占到锅炉总热惯性大小的10%以上,这是CFB锅炉与煤粉炉的重要差异。

(2) 水冷壁/屏模型是正确描述整个锅炉动态过程的关键,但随着锅炉容量的增大,过/再热器和省煤器在锅炉整体动态模型中的重要性也相应增加。

(3) 对于省煤器而言,金属热惯性与工质热惯性同等重要,在省煤器建模中对二者作正确描述就足以保证其动态特性描述的准确性;过/再热器耐火材料与金属热惯性处于相同量级,二者之和占总热

惯性大小的90%以上;工质热惯性为整个水冷壁/屏能量传递过程中的主要因素,耐火材料热惯性为炉侧能量传递过程中的主要环节。

### 参考文献:

- [1] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京, 水利电力出版社, 1987.
- [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, 1994.
- [3] WEISS V, FETT F N, HELMRICH H, et al. Mathematical model of circulating fluidized bed reactors by reference to a solid decomposition reaction and coal combustion[J]. Chemical Engineering and Processing, 1987, 22(2): 79-90.
- [4] 杨海瑞, WIRSUM M, 吕俊复, 等. CFB锅炉内物料停留时间的模型研究[J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 143-146.
- [5] KANG S K, KWON T W, KIM S D. Hydrodynamic Characteristics of Cyclone Reactors[J]. Powder Technology, 1989, 58(3): 211-220.
- [6] 国井大藏. 流态化工程[M]. 北京, 石油化学工业出版社, 1977.
- [7] BABU S P, SHAH B, TALWALKAR A. Fluidization correlations for coal gasification materials—minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio[J]. AIChE Symposium Series, 1978, 74(176): 176-186.
- [8] 杨 晨, 何祖威, 唐胜利, 等. 大型循环流化床锅炉整体动态模型的构成及其求解方法[J]. 化工学报, 2001, 52(12): 1083-1089.

### · 书 讯 ·

## 《电工电子技术》

本书由16章及3个附录组成,包含了电路基础、电工基础知识与技能、电子技术基础等相关内容。在结构编排上本书打破了习惯上将电路基础、电工基础和电子技术基础3个部分割裂分篇介绍的传统,将电路基础、电工基础知识与技能、电子技术基础等相关内容有机地连接在一起,使全书各章节内容融合成为一个连贯的整体。在内容选取上注意突出职业技术教育的特点,在保证将电工与电子技术的基础理论讲解清楚的同时,突出了应用特色,强调了实际操作的方法与技能。读者对象:高职高专电子电气、机电类各专业师生,电子电气、机电类相关工程技术人员。

2009年5月出版。

**versible Closed Type Brayton Heating-and-power Cogeneration Plant**[ 刊, 汉] / TAO Gui-sheng, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate School, Naval University of Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 604 ~ 608

By adopting a finite time thermodynamic method, studied was the exergy economic performance of an irreversible closed type Brayton cogeneration plant under the condition of a constant temperature heat source and derived were its profit margin and exergy coefficient analytic expression. By employing a numerical calculation method, with the profit margin serving as a target, optimized were the distribution of heat conductivity and the choice of pressure ratio. The authors have studied the optimum profit margin and corresponding exergy efficiency characteristics and analyzed the influence of various design parameters of the cogeneration system on its optimized performance. The research results show that for a given total heat conductivity, there exist only one optimum heat conductivity distribution ratio and pressure ratio among heat exchangers at high temperature, low temperature and end-user side, which results in an maximal value of the non-dimensional profit margin of the plant. In the meantime, there is an optimum end-user temperature. **Key words:** finite time thermodynamics, closed type Brayton heating-and-power cogeneration plant, exergy economic performance, profit margin

**循环流化床锅炉热惯性分析 = An Analysis of Thermal Inertia of a CFB (Circulating Fluidized Bed) boiler**[ 刊, 汉] / LI Jin-jing, LI Yan, LU Jun-fu, et al (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 609 ~ 613

The thermal inertia of a CFB (Circulating Fluidized Bed) boiler represents an important factor affecting the boiler dynamic characteristics. From the standpoint of a dynamic energy balance, defined was the thermal inertia of the CFB boiler. For boilers rated at 6 different capacities, calculated respectively were their thermal inertia magnitudes in various links of energy transfer. The calculation results show that the total thermal inertia magnitude of a boiler increases with an increase of its capacity, however, its unit evaporative capacity decreases with an increase of its capacity. Thermal inertia of a working medium and refractory materials constitutes a control link in the energy transfer process. As far as an economizer is concerned, metallic thermal inertia is of equal importance to that of a working medium. The thermal inertia of refractory materials in superheaters/reheaters is of the same magnitude order as the metallic thermal inertia. In water walls/panels, the working medium thermal inertia is considered as the biggest. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, heat transfer, thermal inertia

**电站煤粉锅炉炉内压力信号的混沌特性 = Chaotic Characteristics of In-furnace Pressure Signals in a Pulverized Coal-fired Utility Boiler**[ 刊, 汉] / NIU Wei-ran, QIU Yan, TIAN Mao-cheng (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), LIU Zhi-chao (Thermal Energy Research Institute, Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 614 ~ 617

The in-furnace process of a large-sized coal-fired utility boiler features a complex non-linear time-variation one. With a comprehensive consideration of the practical operation of a coal-fired utility boiler and the application of chaotic kinetics theory, studied were the in-furnace chaotic motion characteristics with the in-furnace pressure serving as a parameter-variable. By employing a power spectrum method, Cao method and Kolmogorov entropy, it can be confirmed that the in-furnace pressure signals are chaotic ones involving random signals, of which the fluctuation range is about 50% to 75% of that of the chaotic signals. If the phase space for chaotic motion is restructured by a time delay of 8 s and the number of inserted dimensions totaling 8 in a pulverized-coal boiler under a normal operating condition, the correlative in-furnace motion dimension is ascertained as 6.56 through a calculation and there exists a positive Lyapunov index of 0.019 4 with Kol-