

学校编码: 10384

分类号: \_\_\_\_\_ 密级: \_\_\_\_\_

学 号: 19220051301763

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

循 环 流 化 床 锅 炉 动 态 特 性 研 究

Investigation on Dynamic Characteristics of Circulating  
Fluidized Bed Boiler

范 利 明

指导教师姓名: 曹 志 凯 副 教 授

专 业 名 称: 化 学 工 程

论文提交日期: 2008 年 6 月

论文答辩时间: 2008 年 7 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

# 循环流化床锅炉动态特性研究

## 摘 要

循环流化床锅炉(CFBB)以其燃料适应性广、燃烧效率高、污染物排放量低等优点得到越来越广泛的应用,分析和研究其动态特性,对锅炉的设计改进、参数优化等具有十分重要的现实意义。利用数学模型既可以对锅炉的动态特性进行很好的研究又可以克服实物试验所带来的代价昂贵等缺点,因此,循环流化床锅炉的建模和仿真研究就显得十分重要。

本文以济南某锅炉厂  $220\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ 工业锅炉为研究对象,对其进行建模和仿真研究。所建模型包括两大部分:锅炉正常运行工况下的数学模型和锅炉启动(开车)过程的数学模型。

首先,锅炉正常运行工况下的数学模型分为燃烧系统和汽水系统模型,其中燃烧系统又分为密相区和稀相区。密相区处于全混流状态,采用集中参数的建模方法建立了关于氧气浓度、床料、残碳和相区总能量平衡的方程;稀相区近似看作平推流,气体和固体颗粒沿炉膛高度方向呈活塞流运动状态,采用分布参数的建模方法对氧气浓度、床料、残碳及相区总能量进行衡算,分别建立了密稀相区的数学模型。对燃烧系统进行阶跃仿真和实时仿真,阶跃仿真的输入变量包括给煤、一二次风,结果可以很好的反映输入变量发生阶跃变化时系统的动态响应情况;实时仿真的结果与现场采集到的数据能很好的吻合。

汽水系统包括有蒸发区和过热器,蒸发区模型采用分环节集中化方法建模,汽包和上升管作为一个集中环节,下降管单独作为一个集中环节。对两部分进行质量和能量的衡算从而得到关于汽包压力和水位的动态方程。过热器则直接采用集中参数法建立模型。通过对过热器内工质进行质量和能量的衡算得到关于过热蒸汽的压力和温度的动态方程。然后对汽水系统做阶跃仿真验证,结果表明模型可以很好的反映汽水系统输出变量随输入变量的变化趋势。

接下来,通过水冷壁及过热器传热公式将循环流化床锅炉燃烧系统和汽水系统进行结合,形成了循环流化床锅炉整体动态模型,然后对模型进行了仿真研究。

锅炉的启动过程模型分为两个阶段,第一个阶段是投煤前(由预燃室过来的)热烟气对惰性床料的纯加热阶段,第二个阶段是投煤以后的反应阶段。对前一个

阶段从全床的热平衡角度考虑建立床温的动态模型,第二个阶段采用集中化的方法建立关于氧浓度,床料,残碳和床料温度的动态方程。对两个阶段进行联合求解,得到整个启动过程中床层温升曲线,该温升曲线和实际过程有较好的一致性,从而表明模型的正确性。最后,用模型模拟并对比了不同操作条件下锅炉的温升曲线,结果亦表明了模型的正确性。

关键词: 循环流化床锅炉(CFBB); 动态特性; 仿真

厦门大学博硕士论文摘要库

# **Investigation on dynamic characteristics of circulating fluidized bed boiler**

## **Abstract**

Circulating fluidized bed boiler (CFBB) becomes more and more attractive to industries due to its advantages mainly of wide fuel adaptability, high combustion efficiency and low pollutants emissions. It is of great practical significance to analyse and investigate its dynamic characteristics for improving the design and optimizing parameters of the boiler. Modeling so as to the simulation of CFBB becomes indispensable as utilizing mathematical model can easily study the dynamic characteristics of boiler without or fewer experiments, which are normally costly.

Focus on the industrial  $220\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$  CFB boiler, models for normal operation condition and process startup were developed and simulations under these circumstances were carried out in this work.

In detail, model for normal operation condition was composed of a combustion system and a steam-water system, in which dense and dilute regions were considered in the combustion system and the dense region was regarded as a stirred tank reactor. Equations describing oxygen concentration, total solid particles in the bed, unburned carbon and total energy were established using the lumped-parameter method. While the gas and solid particles in the dilute region were regard as at the tubular flow condition, and equations for oxygen concentration, total solid particles in the bed, unburned carbon and total energy were obtained based on distributed parameter solution. As the models were built up, the step changes and the real-time simulation for the combustion system were able to be implemented. The results for step changes simulation with amount of coal, primary and secondary air quantity as input variables could reflect well the dynamic response of system. And the real-time simulation is in a good agreement with the industrial data.

The steam-water system includes an evaporation region and a super-heater. In this work, the evaporation region was divided into two sections: drum and riser-tube,

and downcomer. For each section, the lumped-parameter method is applied, and the dynamic equations about drum pressure and water level were established by mass and energy balance. The model of the super-heater is established directly by the lumped-parameter method, and the dynamic equations of the superheated steam pressure and temperature can be gained through the mass and energy balance of working fluid within the super-heater. Using these models, the step changes simulation for the steam-water system was performed, and the results of simulation reflect the dynamic response of system fairly well.

Bridging the combustion and the steam-water system of the CFBB via the heat exchange formulas of the water-cooled wall and super-heater, the comprehensive dynamic mathematic model was finally buildup for the whole CFBB system, by which dynamic behaviours for CFBB operations can be simulated.

The model of startup process was composed of two phases: the heating by the gas from preheat chamber for solid particles before adding coal; and the reaction after coal was fed. The model for the former is obtained based on the energy balance of the whole bed, while for the latter the model consists of dynamic equations of oxygen concentration, total bed material in the bed, unburned carbon mass and total energy. The curves for temperature increase in the whole startup process can be simulated by solving these two models cooperatively. The model system were validated by comparing the prediction with actual performances of the CFBB. Finally, the validated model system was used to simulate the curves for temperature increase of CFBB in different operating conditions, and the results also indicated the model is right.

Keywords: Circulation Fluidized Bed Boiler (CFBB); Dynamic Characteristic; Simulation

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 循环流化床锅炉（CFBB）结构及工艺简介 .....	2
1.3 循环流化床锅炉的发展概况 .....	3
1.3.1 国外循环流化床锅炉技术的发展 .....	3
1.3.2 国内循环流化床锅炉技术的发展 .....	5
1.4 循环流化床锅炉数学模型简介 .....	6
1.4.1 循环流化床锅炉建模的目的及意义 .....	6
1.4.2 数学模型分类 .....	7
1.4.3 循环流化床锅炉建模方法介绍 .....	7
1.4.4 循环流化床锅炉燃烧系统数学模型介绍 .....	9
1.4.5 循环流化床锅炉汽水系统数学模型介绍 .....	13
1.4.6 循环流化床锅炉启动过程数学模型介绍 .....	16
1.5 论文工作安排 .....	16
<b>第二章 循环流化床锅炉燃烧系统建模与仿真</b> .....	18
2.1 循环流化床锅炉密相区动态模型 .....	18
2.1.1 密相区氧浓度平衡 .....	19
2.1.2 密相区床料质量平衡 .....	19
2.1.3 密相区残碳质量平衡 .....	19
2.1.4 密相区总能量平衡 .....	19
2.2 循环流化床锅炉稀相区动态模型 .....	20
2.2.1 稀相区氧浓度的质量连续性方程 .....	21
2.2.2 稀相区床料的质量连续性方程 .....	23
2.2.3 稀相区残碳的质量连续性方程 .....	23
2.2.4 稀相区能量连续性方程 .....	23
2.3 数值算法 .....	24
2.4 模型求解与仿真 .....	26



2.4.1 模型的稳态求解.....	27
2.4.2 模型的动态求解与仿真.....	28
2.5 本章小结 .....	34
<b>第三章 循环流化床锅炉汽水系统建模与仿真.....</b>	<b>35</b>
3.1 汽水系统模型 .....	35
3.1.1 蒸发区模型.....	35
3.1.2 过热器模型.....	38
3.2 模型的求解与仿真 .....	40
3.2.1 模型的稳态求解.....	42
3.2.2 模型的动态求解与仿真.....	42
3.3 本章小结 .....	46
<b>第四章 循环流化床锅炉整体模型与仿真.....</b>	<b>48</b>
4.1 循环流化床锅炉整体动态建模 .....	48
4.2 模型的求解与仿真 .....	48
4.2.1 模型的稳态求解.....	49
4.2.2 模型的动态求解与仿真.....	49
4.3 本章小结 .....	53
<b>第五章 循环流化床锅炉点火启动过程的建模与仿真.....</b>	<b>54</b>
5.1 锅炉启动过程介绍 .....	54
5.1.1 锅炉的点火.....	54
5.1.2 锅炉启动过程简述.....	56
5.2 循环流化床锅炉启动过程建模 .....	57
5.2.1 模型的简化假设.....	57
5.2.2 启动过程模型 .....	58
5.3 模型的求解与仿真 .....	59
5.3.1 模型的稳态求解.....	59
5.3.2 模型的动态求解与仿真.....	60
5.4 本章小结 .....	65

第六章 结束语.....	66
参考文献.....	68
附录 符号说明.....	73
致谢.....	73

厦门大学博硕士论文摘要库

# Content

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b> .....	1
<b>1.1 Foreword</b> .....	1
<b>1.2 Briefs of CFBB Structure and Technology</b> .....	2
<b>1.3 Development Survey of CFBB</b> .....	3
1.3.1 Technology Development of Circulating Fluidized Bed Boiler on Abroad.....	3
1.3.2 Technology Development of Domestic Circulating Fluidized Bed Boiler .....	5
<b>1.4 Review of Mathematical Model for CFBB</b> .....	6
1.4.1 Significance of CFBB Modelling .....	6
1.4.2 Classification of CFBB Models .....	7
1.4.3 Introduction to the Modeling Method of CFBB .....	7
1.4.4 CFBB Combustion System Modelling .....	9
1.4.5 CFBB Steam-water System Modelling.....	13
1.4.6 CFBB Startup Process Modelling.....	16
<b>1.5 Objectives</b> .....	16
<b>CHAPTER 2 MODELING AND SIMULATION OF CFBB COMBUSTION SYSTEM</b> .....	18
<b>2.1 Dynamic Model for CFBB Dense Region</b> .....	18
2.1.1 Oxygen Concentration in Dense Region .....	19
2.1.2 Solid Particles in Dense Region .....	19
2.1.3 Unburned Carbon in Dense Region.....	19
2.1.4 Balancing Total Energy in Dense Region.....	19
<b>2.2 Dynamic Model for Dilute Region in CFBB</b> .....	20
2.2.1 Mass Continuity Equation of Oxygen Concentration in Dilute Region .....	21

2.2.2	Mass Continuity Equation of Solid Particles in Dilute Region.....	22	
2.2.3	Mass Continuity Equation of Unburned Carbon in Dilute Region.....	23	
2.2.4	Energy Continuity Equation of Dilute Region.....	23	
<b>2.3</b>	<b>Numeric Arithmetic .....</b>	<b>24</b>	
<b>2.4</b>	<b>Model Solving and Simulation .....</b>	<b>26</b>	
2.4.1	Steady-state Solution and Simulation of the Model .....	27	
2.4.2	Dynamic Solution and Simulation of the Model.....	28	
<b>2.5</b>	<b>Summaries .....</b>	<b>34</b>	
<b>CHAPTER 3 MODELING AND SIMULATION OF CFBB</b>			
<b>STEAM-WATER SYSTEM.....</b>			<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Steam-water System Model.....</b>	<b>35</b>	
3.1.1	Evaporation Region Model .....	35	
3.1.2	Super Heater Model.....	38	
<b>3.2</b>	<b>Model Solving and Simulation .....</b>	<b>40</b>	
3.2.1	Steady-state Solution and Simulation of the Model.....	41	
3.2.2	Dynamic Solution and Simulation of the Model .....	42	
<b>3.3</b>	<b>Summaries .....</b>	<b>46</b>	
<b>CHAPTER 4 MODEL AND SIMULATION OF CFBB</b>			
<b>INTEGRATED SYSTEM.....</b>			<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>Integrated Dynamic Modeling of CFBB .....</b>	<b>48</b>	
<b>4.2</b>	<b>Model Solving and Simulation .....</b>	<b>48</b>	
4.2.1	Steady-state Solution and Simulation of the Model.....	48	
4.2.2	Dynamic Solution and Simulation of the Model .....	49	
<b>4.3</b>	<b>Summaries .....</b>	<b>52</b>	
<b>CHAPTER 5 CFBB STARTUP MODELING AND SIMULATION</b>			<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Introduction to Boiler Startup .....</b>	<b>53</b>	
5.1.1	Ignition of Boiler .....	53	
5.1.2	Brief Description of Boiler Startup.....	55	

---

<b>5.2 Modeling the CFBB Startup</b> .....	56
5.2.1 Simplifying Assumptions for the Model .....	56
5.2.2 Startup Model.....	57
<b>5.3 Model Solving and Simulation</b> .....	58
5.3.1 Steady-state Solution of the Model.....	58
5.3.2 Dynamic Solution and Simulation of the Model .....	58
<b>5.4 Summaries</b> .....	64
<b>CHAPTER 6 CONCLUSION</b> .....	66
<b>REFERENCES</b> .....	68
<b>APPENDIX</b> .....	73
<b>ACKNOWLEDGEMENTS</b> .....	79

# 第一章 绪论

## 1.1 前言

我国是世界上最大的煤炭生产国，也是目前世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一。我国每年煤炭的消费量约 13.75 亿吨，其中 80% 通过燃烧被利用，而全国燃煤发电的用煤量占燃煤总产量的 30% 以上。研究表明，到 21 世纪中期，煤炭都将是我国主要的一次能源。然而，我国煤炭的特点是难选煤多，高灰、高硫煤比重大，原煤中含硫量超过 2% 的高硫煤占 20%，原煤入选比例低。有资料表明 2006 年一年因煤燃烧有超过 2500 多万吨的  $\text{SO}_2$  排向大气，造成了严重的环境污染<sup>[1-4]</sup>。节约能源与保护环境已成为现有燃煤技术所需解决的主要问题。因此，寻求一种高效、低污染燃烧技术，开发新的燃烧设备成为当务之急。

循环流化床锅炉技术是上世纪 80 年代发展起来的新技术，其燃烧是处于煤的层燃燃烧和煤粉燃烧之间的一种燃烧方式，该技术因其低温动力控制燃烧、高速度高浓度通量的固体物料流态化循环过程、高强度的热量、质量和动量传递过程及炉内直接脱硫脱硝等特点而成为一种低污染燃烧技术。总体来说，循环流化床锅炉技术具有燃料适应性广，特别适合中低硫煤；燃烧效率高，可达 95%~99%；氮氧化物排放低， $\text{NO}_x$  可减少 50%；负荷调节比大和负荷调节快、综合利用效果好等优点<sup>[2,5]</sup>。近年来，世界各国对循环流化床锅炉的研究十分活跃，也使得其发展尤为迅速，已经成为公认的清洁燃煤技术领域的研究重点和热点。

目前，循环流化床锅炉在电站锅炉、工业锅炉、废弃物处理利用、石油、化工、冶金、能源和环保等工业领域得到广泛的应用。在我国目前环保要求日益严格、电厂负荷调节范围较大、煤种多变、原煤直接燃烧比例高、国民经济发展不平衡、燃煤与环保的矛盾日益突出的情况下，循环流化床锅炉已成为首选的高效低污染燃烧设备<sup>[4]</sup>。

当然，循环流化床也存在一定的问题或缺点，如其对燃煤的粒径有一定的要求，否则难以保证其设计效率，还有诸如锅炉系统的烟风阻力较大，需要采用高压鼓风机，耗电量大、另外锅炉受热面的磨损严重等问题都需要进一步的研究来加以解决。

## 1.2 循环流化床锅炉（CFBB）结构及工艺简介

循环流化床锅炉是在鼓泡床锅炉的基础上发展而来的，两者之间既有联系，也有区别。两者结构上最明显的区别是流化床锅炉在炉膛出口安装了气固分离器，可以将烟气中的固体颗粒收集起来，送回炉膛燃烧，一次未燃尽而飞出炉膛的颗粒可以再次参与燃烧，大大提高了燃尽率。

循环流化床锅炉通常由炉膛、气固分离器、灰回送系统、尾部受热面、汽包、上升、下降管和辅助设备组成。一些循环流化床还有外置热交换器(EHE)。图1-1为一典型的循环流化床锅炉系统示意图。其工作原理简述如下：破碎至合适粒度的燃料及石灰石脱硫剂由给煤机和给料机从流化床布风板上部给入，燃烧室底部引入一次风，使给入的燃料在炽热的床料中被迅速加热并呈流态化燃烧，石灰石则与燃料燃烧生成的 $\text{SO}_2$ 反应生成 $\text{CaSO}_4$ ，从而起到脱硫的目的。在燃烧室

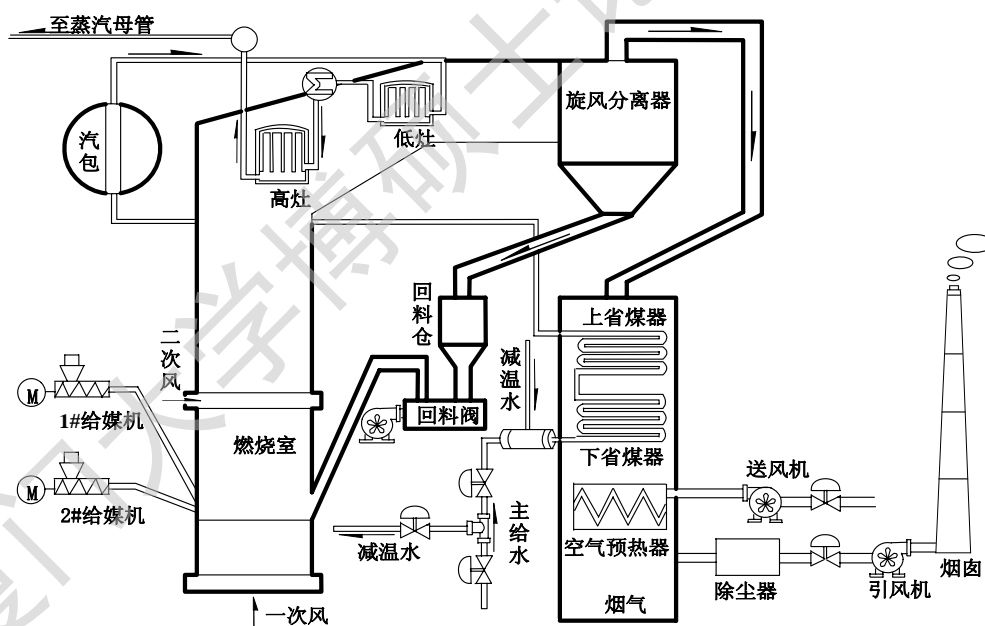


图 1-1 典型循环流化床锅炉系统示意图

上部引入二次风，从而提高锅炉的燃烧效率并有效地控制 $\text{NO}_x$ 的生成量。燃烧室温度控制在 $850^\circ\text{C}$ 左右。在较高风速下，燃烧充满整个炉膛，并有大量固体颗粒被携带出燃烧室，经布置在炉膛出口或过热器后部的高温旋风分离器分离后通过飞灰回送装置再送入炉膛继续燃烧。经旋风分离器导出的高温烟气，在尾部烟道与对流受热面换热后，通过布袋除尘器或静电除尘器由烟囱排除。炉膛密相区的

粗灰经自动或手动排渣机排出。

汽水系统中, 给水经给水母管一次分两路, 一路直接进入给水集箱去省煤器; 另一路进减温器调节主蒸汽温度, 经过热交换以后的水汇入给水集箱去省煤器。经过省煤器热交换预热的水去汽包。主蒸汽从汽包出来后, 经高温过热器、低温过热器热交换后成为成品蒸汽去汽轮机或下级用汽(热)单位。

### 1.3 循环流化床锅炉的发展概况

流态化技术于上世纪 20 年代初在德国首先应用于工业。至 40 年代, 流态化技术几乎在各工业部门中都得到了广泛的应用。而流态化技术真正用于煤的燃烧是上世纪 60 年代的事情<sup>[9]</sup>。由于对能源的需求量不断增加, 人们开始研究流化床燃烧技术, 特别是积极从事燃煤流化床锅炉的研究与开发。

我国对鼓泡流化床锅炉的研究较早, 1965 年第一台流化床锅炉在广东茂名投产, 此后在全国得到迅速发展。但鼓泡流化床锅炉存在一些问题制约了其进一步的发展, 诸如飞灰可燃物大、大型化困难等。为了解决上述问题, 80 年代循环流化床锅炉应运而生。

#### 1.3.1 国外循环流化床锅炉技术的发展

为了开发和完善循环流化床锅炉技术, 各国都投入了大量的人力、物力和财力。目前国外开发循环流化床锅炉的公司主要有德国鲁奇(Lurgi)公司、芬兰的奥斯龙(Ahlstrom)公司、美国巴特尔(Battelle)研究中心、美国福斯特惠勒(Foster Wheeler)公司、德国巴布利克公司(Babcock Werk)公司、斯坦缪勒(Steinmueller)公司、瑞典斯图雅克(Studsvik)公司等。目前, 国际市场上主要有以下几种典型的商业化循环流化床锅炉<sup>[4, 10-13]</sup>。

##### 1.3.1.1 德国鲁奇公司的 CFB 锅炉

鲁奇公司在 80 年代初将流化床技术用于锅炉燃烧获得了巨大的成功, 其循环流化床锅炉的特点主要有:

- 循环系统内设主床燃烧室和外置泡床换热器, 在主床上部布置少数屏式受热面; 再热器和过热器受热面布置在外置换热器和对流烟道之中;
- 根据燃料特性差异, 循环速度在 4.9~9m之间变化, 炉膛出口烟气中的固体



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库