



# 大型循环流化床 锅炉设备与运行

卢啸风 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 大型循环流化床 锅炉设备与运行

---

卢啸风 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是为适应大型电站循环流化床锅炉迅速发展的需要而编写的。

本书针对 220~1025t/h 循环流化床锅炉,介绍了大型循环流化床锅炉的气固流动特性、传热特性、燃烧过程与污染控制特性、启动运行与变负荷特性以及运行优化试验,重点介绍了大型循环流化床锅炉本体及其辅助设备的结构与运行特性,如炉膛、分离器、回料装置、布风装置、尾部汽水受热面、外置式换热器、空气预热器、点火设备、冷渣器、燃煤破碎设备、石灰石及飞灰输送设备。全书还对锅炉膨胀与密封结构、金属受热面与耐火材料的耐磨设计、风帽与测压管的防堵设计、锅炉送风系统、过热器与再热器的布置方式等内容进行了讨论。

本书可作为从事大型循环流化床锅炉研究、设计、安装、调试、运行等工作的技术人员、管理人员的学习教材和参考书,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大型循环流化床锅炉设备与运行/卢啸风编著. -北京:  
中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4030-2

I. 大... II. 卢... III. 流化床-循环锅炉-基本  
知识 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 156775 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 377 千字

印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

循环流化床 (CFB) 燃烧技术是目前已基本实现大型化和商业化的洁净煤燃烧技术, 由于具有燃烧效率高、污染小、煤种适应性好、负荷调节范围大等优点, 在世界各主要工业国家得到大力发展和推广应用。在短短二十几年的时间内, 国外 CFB 锅炉容量已达到 300MW (1025t/h), 国内循环流化床锅炉用户市场更是以几何数量级增长。国内大型循环流化床电站锅炉的设计、安装、调试、运行、检修人员以及大中专学校相关专业的师生, 迫切需要一本系统介绍大型循环流化床锅炉设备结构、系统配置、运行特性、现场试验的专业参考书。为满足技术人员和师生的迫切需求, 特编写了本书。

本书除绪论外, 共分八章。全书简要介绍了循环流化床锅炉的基本结构和发展概况和流态化基础知识、循环流化床内的气固流动与传热特性、循环流化床内燃烧与污染控制特性, 重点介绍了大型循环流化床锅炉高温循环回路的结构和关键部件, 以及大型循环流化床锅炉燃烧辅助系统, 探讨了大型循环流化床锅炉的汽水系统和尾部受热面的布置问题, 以及大型循环流化床锅炉运行控制、启停操作和事故处理, 最后叙述了大型电站循环流化床锅炉的燃烧调整试验。

本书作者从事流化床燃烧技术研究及工程应用工作已 20 余年, 近年参与了国内主要大型循环流化床锅炉的建设工作。作者及其同事们在从事国内大型循环流化床锅炉工程技术的经验总结和体会的基础上, 编著了本书。本书收纳了作者在美国留学期间所收集到的国外著名锅炉制造厂商的 CFB 锅炉技术资料, 还大量参考和使用了四川电力试验研究院、四川电力勘察设计研究院、西南电力设计院、四川内江高坝发电厂、四川白马 300MW 循环流化床发电有限责任公司、四川宜宾发电有限责任公司、中美合资重庆南川爱溪电力有限公司、西安热工研究院有限公司、东方锅炉股份有限公司、哈尔滨锅炉股份有限公司、上海锅炉厂有限公司的研究成果或技术资料。在此对以上单位给予的支持表示深深的谢意。

本书的主要内容曾被编写成 CFB 锅炉电厂运行人员的培训教材, 在中国华电集团公司四川宜宾发电有限责任公司 ( $1 \times 100\text{MW}$  CFB 锅炉和  $1 \times 150\text{MW}$  CFB 锅炉)、四川白马 300MW 循环流化床发电有限责任公司、中国国电集团公司四川岷江发电有限责任公司 ( $2 \times 135\text{MW}$  CFB)、四川攀枝花攀煤研石发电有限责任公司 ( $2 \times 135\text{MW}$  CFB) 运行人员技术培训中使用, 得到了良好的评价。

在本书编写过程中, 中国国电集团公司科技环保部钟鲁文高级工程师、四川电力试验研究院王大军高级工程师、中国华电集团公司四川宜宾发电总厂刘白天高级工程师、四川白马循环流化床发电有限责任公司总经理胡昌华高级工程师、陶世健高级工程师、中国国电集团公司四川岷江发电有限责任公司总经理魏光德高级工程师给予了许多帮助并提出了许多宝贵意见, 在此表示深深的谢意。

作者要特别感谢西安热工研究院有限公司循环流化床事业部总工程师孙献斌（教授级高级工程师），在百忙中抽出时间对本书进行了认真仔细的审阅，并提出了许多宝贵意见，使本书质量得到进一步提高。

本书还多处引用重庆大学锅炉燃烧研究室的同事及研究生的大量研究资料，并在撰写过程中得到了他们的帮助。

由于水平所限，加之当今大型循环流化床锅炉技术的快速发展，书中谬误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

**编者**

**2005年8月**

# 目录

大型循环流化床锅炉设备与运行

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 绪论                       | 1   |
| 第一节 循环流化床锅炉的组成及工作过程      | 1   |
| 第二节 循环流化床锅炉燃烧技术的发展概况     | 5   |
| 第一章 流态化基础知识              | 12  |
| 第一节 流态化现象及其基本特征          | 12  |
| 第二节 垂直上升气固流动系统           | 15  |
| 第三节 几个重要的流态化参数           | 19  |
| 第四节 流态化技术在燃煤锅炉上的应用       | 24  |
| 第二章 循环流化床内的气固混合与传热传质     | 26  |
| 第一节 循环流化床内的气固混合特性        | 26  |
| 第二节 循环流化床中的传热过程          | 32  |
| 第三章 循环流化床锅炉的燃烧过程与污染控制    | 36  |
| 第一节 煤在循环流化床中的燃烧过程        | 36  |
| 第二节 循环流化床燃煤过程中的污染控制      | 42  |
| 第三节 循环流化床锅炉灰渣处理与综合利用     | 46  |
| 第四章 循环流化床锅炉燃烧设备与系统       | 51  |
| 第一节 循环流化床锅炉的总体布置         | 51  |
| 第二节 国产大型循环流化床锅炉的典型布置     | 57  |
| 第三节 循环流化床锅炉的炉膛结构         | 67  |
| 第四节 循环流化床锅炉的布风装置         | 76  |
| 第五节 循环流化床锅炉高温循环灰的分离与回送装置 | 80  |
| 第六节 外置式热交换器与点火设备         | 93  |
| 第五章 循环流化床锅炉辅助系统          | 102 |
| 第一节 燃煤制备与给煤系统            | 102 |
| 第二节 石灰石制备与输送系统           | 116 |
| 第三节 底渣冷却设备               | 125 |
| 第四节 烟风系统                 | 133 |
| 第五节 循环流化床锅炉膨胀系统与密封防堵措施   | 138 |
| 第六节 循环流化床锅炉的磨损区域与防磨措施    | 147 |
| 第六章 汽水设备及尾部受热面           | 160 |
| 第一节 蒸发设备                 | 160 |

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 第二节  | 过热器与再热器的结构及汽温特性 .....     | 172 |
| 第三节  | 省煤器与空气预热器 .....           | 186 |
| 第四节  | 尾部受热面磨损、积灰、腐蚀及其预防 .....   | 198 |
| 第七章  | 循环流化床锅炉的运行控制 .....        | 203 |
| 第一节  | 循环流化床锅炉关键运行参数的控制与调节 ..... | 203 |
| 第二节  | 循环流化床锅炉的启停及运行操作 .....     | 209 |
| 第三节  | 循环流化床锅炉运行事故的预防与处理 .....   | 225 |
| 第四节  | 循环流化床锅炉及其辅助系统的运行优化 .....  | 231 |
| 第八章  | 循环流化床锅炉燃烧调整试验 .....       | 240 |
| 第一节  | 循环流化床锅炉冷态流化特性试验 .....     | 240 |
| 第二节  | 循环流化床锅炉热平衡试验 .....        | 244 |
| 第三节  | 循环流化床锅炉运行优化试验 .....       | 254 |
| 参考文献 | .....                     | 259 |



## 第一节 循环流化床锅炉的组成及工作过程

循环流化床锅炉设备包括锅炉本体设备和锅炉辅助设备两部分。这两部分包括的主要部件或设备在锅炉中的位置参见图 0-1。

锅炉各主要部件或设备的作用简述如下。

### 一、锅炉本体设备

#### 1. 汽水系统

汽水系统即所谓的“锅”，由汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、联箱等组成。它的任务是吸收燃料燃烧放出的热量，使水蒸发并最后成为规定压力和温度的过热蒸汽。

(1) 汽包。装在锅炉顶部，是一个圆筒形受压容器，其下部是水，上部是蒸汽。它接受省煤器的来水；汽包与下降管、水冷壁、联箱共同组成水循环回路，并将水冷壁中产生的饱和蒸汽输送至过热器。

(2) 下降管。水冷壁的供水管，即汽包的水流入下降管，并通过水冷壁下联箱分配到水冷壁的各上升管中去。

(3) 水冷壁。布置在燃烧室内四周墙上的许多平行的管子（因管内工质向上流动，也称为上升管）。它的主要任务是吸收燃烧室中的辐射热，使管内的水汽化，蒸汽就是在水冷壁管中产生的。它是锅炉的主要蒸发受热面。此外，它还起保护炉墙的作用。

(4) 过热器。它的作用是利用烟气的热量将饱和蒸汽加热成一定温度的过热蒸汽。

(5) 再热器。大多装在过热器后的烟道中。它的作用是将汽轮机中做过部分功的蒸汽引回锅炉再次进行加热，提高温度后，又送往汽轮机中继续做功，经过再热器加热后的蒸汽称为再热蒸汽。

(6) 省煤器。装在锅炉尾部的垂直烟道中。它是利用烟气的热量加热给水，以提高给

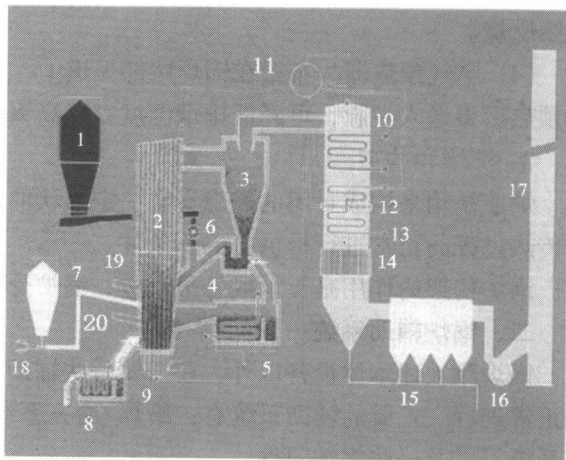


图 0-1 循环流化床锅炉设备的组成及工作过程示意图

1—煤斗；2—炉膛（四周炉墙上布置有水冷壁）；3—高温旋风分离器；4—回料阀；5—外置式热交换器；6—给煤机；7—石灰石仓；8—冷渣器；9—流化风室；10—对流过热器；11—汽包；12—烟道膜式壁下联箱；13—省煤器；14—空气预热器；15—电除尘器；16—引风机；17—烟囱；18—石灰石风机；19—二次风；20—上一次风



水温度，降低排烟温度，节约燃料消耗。

(7) 联箱。起汇集、混合和分配工质的作用。

## 2. 燃烧系统

燃烧系统即所谓的“炉”，由燃烧室、高温旋风分离器、回料系统、空气预热器等组成。它的任务是使燃料在炉内进行良好的燃烧，放出热量。

(1) 燃烧室。也叫炉膛，是供燃料燃烧的地方。它是由炉墙和水冷壁围成的空间，燃料在这种特定的空间中呈流化状态燃烧。

(2) 分离器。有多种结构形式，常见的是高温旋风分离器。它将被烟气从炉膛中带出来的未燃尽的燃料分离下来，让回料系统将其送回炉膛继续燃烧。

(3) 回料系统。布置在分离器下面，它的作用是将分离器分离下来的燃料送回炉膛中继续燃烧。

(4) 空气预热器。布置在锅炉尾部烟道中，其作用是利用烟气余热加热空气，空气经过预热后再送入炉膛，可降低排烟温度，提高锅炉效率。

## 3. 炉墙和构架

炉墙是用来构成封闭的燃烧室和一定形状的烟道，以使火焰和烟气与外界隔绝，为锅炉传热过程的正常进行提供必要的条件。

锅炉构架的作用是支承或悬吊汽包、锅炉受热面、炉墙等全部锅炉构件。

## 二、锅炉辅助系统

锅炉除上述本体设备以外，还需要一些辅助系统来配合工作，才能保证锅炉生产过程的正常进行。主要的辅助系统有：给煤/给石系统、送风/排烟系统、给水系统、除渣/除灰系统等以及一些锅炉附件。

### 1. 煤及石灰石系统

煤及石灰石系统即制备入炉煤及石灰石粉的系统。它的任务是将原煤和石灰石破碎成以一定粒径分布的煤粒和石灰石粉，并分别送入炉膛。煤粒及石灰石粒的粒径分布，对锅炉运行经济性以及脱硫效率影响很大。

### 2. 送风/排烟系统

送风/排烟系统是为维持炉内燃烧工况所需空气以及排出燃料燃烧后所生成的烟气的系统。它主要包括送风机、引风机、高压风机、点火风机、石灰石粉输送风机、仪用空压机等，还包括风道、烟道、烟囱等。

### 3. 给水系统

给水系统由给水泵、给水管道和阀门等组成，它的任务是向锅炉供应给水。由于给水泵安装在汽轮机车间内，故在发电厂中通常将给水泵及一部分给水管道划归汽轮机车间管理。

### 4. 灰渣处理系统

除渣/除灰系统包括除渣装置、除尘器、输灰管路、除灰空压机、渣/灰库等。除渣装置是用来清除燃料燃烧后从燃烧室排出的灰渣（底渣）。除渣装置具有冷却底渣、回收底渣余热和输送底渣的作用。除灰设备主要是除尘器，其作用是清除烟气中携带的飞灰，尽量减少随烟气从烟囱排出的飞灰量，以减轻飞灰对环境的污染和对引风机的磨损。渣/灰

库的作用是临时存放渣/灰，并可以通过输渣/灰机将渣/灰卸到渣/灰车上。整个除渣/除灰系统的任务就是排除锅炉排出的底渣和由除尘器分离出的细灰，并将其送往储灰场。大型循环流化床电站锅炉大多采用机械干式除灰（渣），将渣/灰从渣库（或灰库）中卸到运渣/灰车上。

### 5. 锅炉控制系统

锅炉控制系统主要包括：锅炉燃烧控制子系统、锅炉水位控制子系统、锅炉石灰石控制系统、锅炉给煤控制子系统以及锅炉排渣控制子系统。其主要作用是：通过计算机采集各种运行参数，根据操作指令，控制锅炉运行。

### 6. 点火系统

循环流化床锅炉一般采用柴油点火。点火过程中，点火系统会自动运行炉膛吹扫、点火、火焰确定、点火头退缩冷却等程序。主要有如下三种点火方式：

(1) 采用风道燃烧器点火。点火时，风道燃烧器通过燃油产生的高温烟气（约1500℃）与流化空气混合成900℃左右的热烟气进入水冷风室，经布风板送入炉内，使床料达到着火温度。

(2) 采用床上启动燃烧器点火。在炉内布风板上方约2m高度布置多个燃油启动燃烧器，其燃油量可达500~1000kg/h以上。当床料流化起来后，投运启动燃烧器，使床温升高到煤粒着火温度。

(3) 同时采用上述两种方式点火。某些循环流化床锅炉还同时采用以上两种点火方式。点火系统还具有低负荷稳燃的作用。

### 7. 锅炉附件

锅炉附件包括直接装在汽包上的一次水位计、安全阀、吹灰器、热工仪表、自动控制装置以及一些汽气管道和阀门等。

水位计是用来监视汽包水位高低的。安全阀是锅炉的一种保护设备，用来控制锅炉蒸汽压力使之不超过规定值。吹灰器的作用是清除过热器、再热器、省煤器和空气预热器等锅炉受热面烟气侧表面的积灰，以增强传热效果。热工仪表是监督锅炉工作情况的表计。自动控制装置是用来自动控制和调节锅炉运行工况的。热工仪表和自动控制装置在发电厂中由专门的热工车间来管理和维修。

现参照图0-1说明锅炉的工作过程。

(1) 煤。煤场来煤经燃运车间输煤皮带→碎煤机（一级或二级）→煤斗1→给煤机6→炉膛2。

(2) 风。主要分为一次风、二次风和高压风三种。

1) 一次风。冷风→一次风机→空气预热器14→流化风室9和上一次风道20→炉膛2。

2) 二次风。冷风→二次风机→空气预热器14→二次风道19和播煤风道→炉膛2。

3) 高压风。冷风→高压风机→回料阀4。

(3) 烟。煤粒与空气在炉膛2中燃烧生成高温烟气→加热水冷壁→翼墙受热面→对流过热器10→再热器→省煤器13→空气预热器14（加热上述受热面中的工质，烟温逐渐降低）→电除尘器15→引风机16→烟囱17→排向大气。

(4) 灰。燃烧后生成的灰渣，主要分为底渣（较粗）和飞灰（较细）两部分。

(5) 底渣。从炉膛 2 底部排出→冷渣器 8→渣库→送往灰场。

(6) 飞灰。被烟气从炉膛 2 带出→电除尘器 15→飞灰库→送往灰场。

(7) 水、汽。给水泵来水→锅炉房→省煤器 13（提高水温）→汽包 11→下降管→水冷壁/翼墙下联箱→水冷壁/翼墙（吸热，变成汽水混合物）→回到汽包 11（进行汽水分离）→分离出的蒸汽→对流烟道膜式壁过热器 12→对流过热器 10（加热成过热蒸汽）→主蒸汽管道→汽轮机。

从汽包分离出来的水，进入下降管，重复上述过程。

### 三、国产大型循环流化床锅炉的工作过程

#### 1. 炉内物料的循环燃烧过程

锅炉冷态启动时，在流化床内加装启动物料后，首先启动风道点火器，在点火风道中将燃烧空气加热至 900℃左右后，通过水冷式布风板送入流化床，启动床料被加热，床温升至 550℃之后投入床上点火油枪。床温上升到 600℃并维持稳定后，被破碎成 0~7mm 的煤粒开始分别由给煤装置送入炉膛下部的密相区内，脱硫用石灰石也由给料口同时送入炉膛。燃烧空气分为一、二次风分别由炉底和水冷壁前墙及两侧墙送入。额定负荷正常运行时，占总风量 60%的一次风，经床底水冷风箱，作为一次燃烧用风和床内物料的流化介质送入燃烧室。炉内布置二次风能提供给煤粒足够的燃烧用空气并参与燃烧调整，同时分级布置的二次风在炉内能够营造出局部的还原性气氛，从而抑制燃料中的氮氧化，降低氮氧化物  $\text{NO}_x$  的生成。

在 900℃左右的床温下，空气与燃料、石灰石在密相区炉膛充分混合，煤粒着火燃烧释放出部分热量，石灰石煅烧生成二氧化碳  $\text{CO}_2$  和氧化钙  $\text{CaO}$ ；未燃尽的煤粒被烟气携带进入炉膛上部稀相区内进一步燃烧，这一区域也是主要的脱硫反应区，在这里，氧化钙  $\text{CaO}$  与燃烧生成的二氧化硫反应，生成硫酸钙  $\text{CaSO}_4$ 。

燃烧产生的烟气携带大量床料经炉顶转向，通过位于后墙水冷壁上部的两个烟气出口，分别进入高温旋风分离器进行气—固分离。分离后，含少量飞灰的烟气由分离器中心筒引出通过前包墙拉稀管进入尾部竖井，对布置在其中的高温过热器、低温过热器、再热器、省煤器及空气预热器放热，到锅炉尾部出口时，烟温已降至 130℃左右。被分离器捕集下来的灰，通过分离器下部的立管和回料器送回炉膛实现循环燃烧。

炉膛下部两侧墙或炉底设有多个排渣口，通过对排渣量的控制，使床层压降维持在合理范围内，以保证锅炉良好的运行状态。

大型循环流化床锅炉通常采用风水冷却式流化床冷渣器。运行时，根据锅炉负荷情况和冷渣器出口灰渣温度控制的要求，锅炉给水首先部分或全部引入布置在冷渣器中的水冷管束，之后在混合集箱中与没有通过冷渣器的给水充分混合，再引至尾部烟道省煤器进口集箱，逆流向上经过水平布置的省煤器管组进入省煤器中间集箱，然后向上流经用于悬吊两级过热器管组的省煤器吊挂管，最后汇集到布置在尾部竖井上部的省煤器出口集箱，通过省煤器引出管进入汽包。在启动阶段没有给水流入汽包时，省煤器再循环系统可以将锅水从汽包引至省煤器进口集箱，防止省煤器管子内的水静滞、汽化。

## 2. 锅炉汽水流程

对于自然循环锅炉，锅炉的水循环一般采用集中供水，分散引入、引出的方式。给水引入汽包水空间，并通过集中下降管和下水连接管进入水冷壁和水冷蒸发屏进口集箱。锅水再向上流经炉膛水冷壁、水冷蒸发屏的过程中被加热成为汽水混合物，经各自的上部出口集箱通过汽水引出管引入汽包进行汽水分离。被分离出来的水重新进入汽包水空间，并进行再循环，被分离出来的饱和蒸汽从锅筒顶部的蒸汽连接管引出。

饱和蒸汽从汽包引出后，由饱和蒸汽连接管引入尾部竖井侧包墙上集箱，依次流经包墙侧墙、前墙、后墙后，汇集到低温过热器进口集箱并对低温过热器管组进行冷却，然后引到炉内的屏式过热器，在屏式过热器出口经两侧交叉后，同时返回到尾部竖井中的高温过热器，最后，合格的过热蒸汽由高温过热器出口集箱单侧引出。当采用汽冷旋风分离器时，由汽包引出的过热蒸汽，先流过汽冷旋风分离器，再流向尾部烟道包墙管。

过热器系统通常布置有两级喷水减温：一级减温器布置在低温过热器出口至屏式过热器入口管道上，作为粗调；二级减温器（左右各一台）位于屏式过热器与高温过热器之间的连接管道上，作为细调。

再热器有多种布置方法，一般将蛇形管形式的低温再热器布置在尾部烟道中，将以屏式受热面形式的高温再热器布置在炉膛上部，通过调节烟道烟气挡板进行汽温初调。此外，低温再热器入口一般布置有事故喷水减温在紧急情况下控制再热器入口汽温，高温再热器入口布置喷水减温器对再热器出口汽温进行细调。从汽轮机高压缸排出的蒸汽依次经低温再热器、高温再热器加热后，回到汽轮机继续做功。

此外，也有将全部再热器或部分再热器布置在外置式热交换器中的设计方案。

## 第二节 循环流化床锅炉燃烧技术的发展概况

### 一、循环流化床技术的发展历史

人类对流态化现象的认识由来已久，人类社会在很久以前已或多或少地开始认识到流态化现象。早在《天工开物》（宋应星 1637）中就记载了采用不断颠簸的方法，大幅度减少固体颗粒之间内摩擦力的作用，使谷物具有一定的流动特性，达到与砂粒分离的目的。这一原理至今仍在摇床选矿过程中得到应用，可以看作是固体流态化技术的雏形。

第一台成功运行的流化床是德国人温克勒（Friz Winkler）于 1921 年 12 月发明的，他将燃烧产生的烟气引入一个装有焦炭颗粒的炉室的底部，然后观察了固体颗粒因受气体的阻力而被提升，整个颗粒系统看起来就像沸腾的液体。温克勒所发明的流化床使用粗颗粒床料。

循环流化床真正成为具有工业实用价值的新技术是在 20 世纪五六十年代。50 年代，M. W. Kellogg 公司发展并在南非的萨尔伯格（Saroilburg）建造运行了应用流态化原理的 Saso 费—托反应器；60 年代末，德国鲁奇（Lurgi）公司发展并运行了 Lurgi/VAW 氢氧化铝流化床焙烧反应器；随后，由于分子筛高活性、高选择性催化剂的出现，提升管流化催化裂化反应器很快又取代了鼓泡流化床而得到推广应用。1971 年，Reh 提出了一个循环流化床的流态图，并描述了循环流态化的基本特征。1976 年，Yerushalmi 等首次提出了快速流态

化的概念，从而引起了人们对循环流化床技术的日益重视，并从 80 年代开始形成了一个循环流化床基础研究的高峰期。

我国对于流态化技术最早的研究是汪家鼎院士关于流化床褐煤低温干馏技术的研究。我国对循环流化床的研究是从 50 年代末在中科院化学冶金研究所开始的。此后，特别是 80 年代以来，国内各主要高等院校和一些研究所也相继开始循环流化床的研究开发工作，这些研究工作主要是针对循环流化床燃煤锅炉进行的。通过这些基础研究，国内自行设计投运了一大批 35~75t/h 的循环流化床锅炉，并在消化吸收国外先进技术基础上，投运了具有自主知识产权的国产 100MW 级循环流化床锅炉，同样具有自主知识产权的 200MW 级循环流化床锅炉已进入设计制造阶段。

## 二、国外循环流化床（CFB）锅炉的发展概况

国外许多 CFB 技术与开发公司在长期实际运行和大量试验的基础上形成了各具特色的循环流化床锅炉技术，并且将其技术转让给其他一些锅炉设计制造商，为循环流化床锅炉技术的不断发展做出了历史性的贡献。

早期容量较小的循环流化床锅炉类型较多，经过不断发展完善和大型化以后，目前较有代表性的大型炉型如下。

### 1. 德国鲁奇公司开发的 Lurgi 型循环流化床锅炉

德国鲁奇公司是世界上最早从事循环流化床燃烧技术与开发的公司之一，其 CFB 专利技术先后转让给国外多家锅炉制造商。采用 Lurgi 型循环流化床技术的首台大容量 95.8MW 循环流化床锅炉机组于 1985 年在德国 Duisburg 电站投运。1990 年，由美国 ABB-CE 公司生产的 150MW Lurgi 型循环流化床锅炉在美国 Texas-New Mexico 的 TNT 电厂投运。1995 年，由法国 Stein 公司生产的 250MW Lurgi 型循环流化床锅炉在法国 Gardanne 电厂投运，这台锅炉是 2000 年以前世界上最大容量的循环流化床锅炉。Lurgi 型循环流化床锅炉的结构特点为：将燃烧与传热分开，外置式流化床热交换器内同时布置有过热器和再热器，用水冷锥形阀控制循环灰的流量。具有负荷调节、床温控制灵活性大，燃料适应性极好，燃烧效率高，脱硫效率和石灰石利用率较高等优点，但系统过于复杂。图 0-1 是典型的 Lurgi 型循环流化床锅炉。

### 2. 芬兰奥斯龙（Ahlstrom）公司的 Pyroflow 型循环流化床锅炉

从 1979 年在芬兰投运第一台商业循环流化床锅炉至今，Pyroflow 型循环流化床锅炉已生产了 150 多台，是目前世界上运行台数最多的一种循环流化床锅炉。

目前，Pyroflow 型循环流化床锅炉运行的最大容量为 180MW，设计中的最大容量为 300MW。它的结构特点为：无外置式热交换器，炉内布置有翼墙受热面和  $\Omega$  形过热器，回料阀一分为二，采用猪尾形布风风帽，具有系统简单、结构紧凑、厂用电较低等优点，锅炉出力、参数、热效率、燃料适应性等都能达到令人满意的水平，可用率达 98%。由于无低温循环灰调节床温，因此对煤的破碎粒径有一定要求。

图 0-2 是芬兰奥斯龙（Ahlstrom）公司的 Pyroflow 型 410t/h 循环流化床锅炉。

这种循环流化床锅炉的大型化问题也已顺利解决，已有各种容量的大型电站锅炉在世界各地运行。

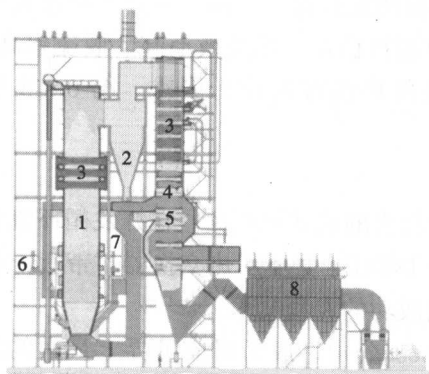


图 0-2 芬兰奥斯龙 (Ahlstrom) 公司的 Pyroflow 型 410t/h 循环流化床锅炉  
1—炉膛；2—旋风分离器；3—过热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—加料口；7—石灰石进料口；8—除尘器

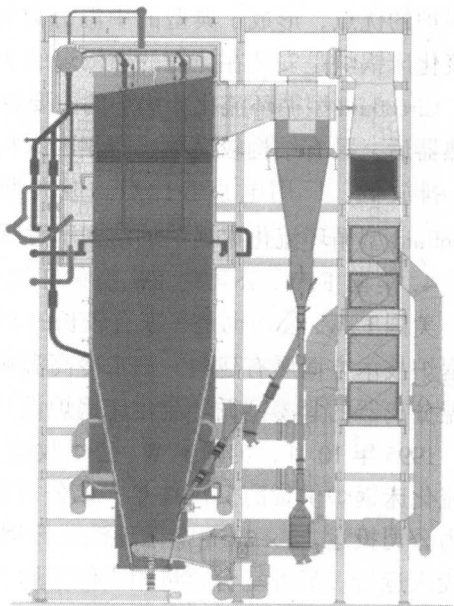


图 0-3 Circofluid 型循环流化床锅炉

1999 年，芬兰奥斯龙 (Ahlstrom) 公司将其设计、制造循环流化床锅炉的部门出售给了美国 F.W. 公司。因此该炉型现已成了美国 F.W. 公司生产的 CFB 锅炉炉型之一。

### 3. 德国 Babcock 和 VKW 公司开发的 Circofluid 型循环流化床锅炉

Circofluid 型循环流化床锅炉 (图 0-3) 较好地保持了鼓泡流化床和高倍率循环流化

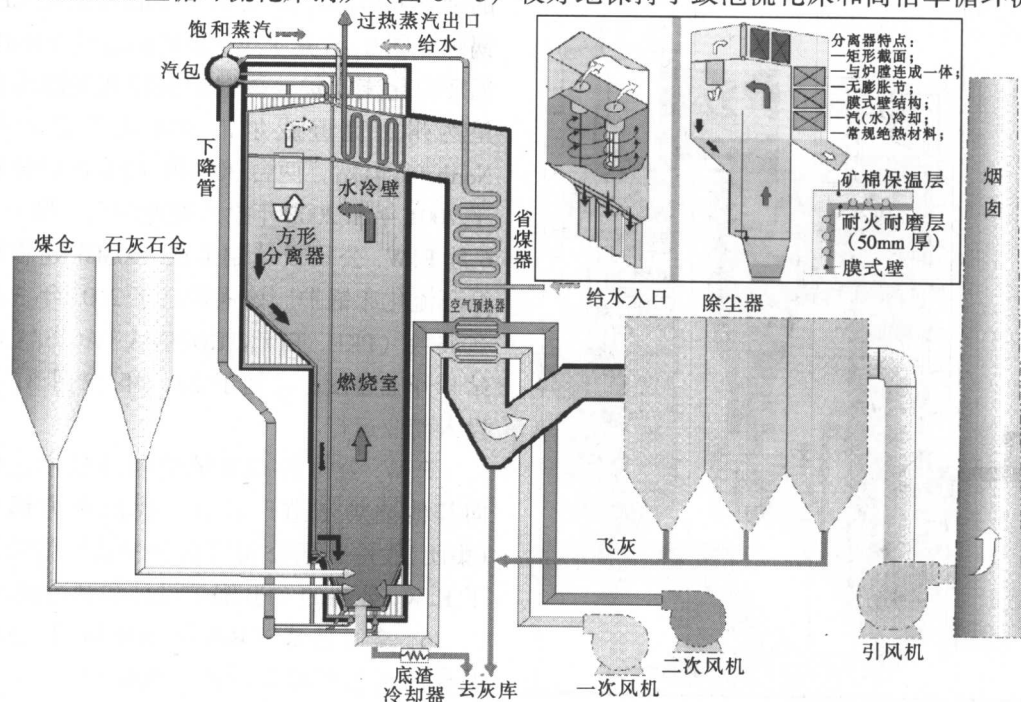


图 0-4 美国 F.W. 公司制造的紧凑型 CFB 锅炉结构示意图

床锅炉的优点，形成了典型的中温分离循环流化床锅炉，目前最大容量的 Circofluid 型循环流化床锅炉是安装在捷克的燃褐煤的 350t/h 高压电站锅炉。

Circofluid 型循环流化床锅炉的主要特点为：布置有两级分离器，第二级分离器布置在过热器后。具有结构较简单、密相区床料储存量大、运行稳定、燃烧效率高、脱硫率高、 $\text{NO}_x$  排放低、厂用电小等优点。但大型化，特别是再热器布置较为困难。图 0-3 是 Circofluid 型循环流化床锅炉的结构示意图。

#### 4. 美国 F.W. 公司的 FW 型循环流化床锅炉

美国 F.W. 公司也是一家有较长的 CFB 锅炉生产历史的锅炉制造商，在开发循环流化床锅炉技术方面屡有建树。汽水冷高温旋风分离器、INTREX 循环灰热交换器、带有方形高温分离器的紧凑型循环流化床锅炉设计都是其运用成功的专利技术。

1995 年 10 月，美国 F.W. 公司收购了芬兰 Ahlstrom 公司，成为目前世界上最大的循环流化床锅炉供货商。1993 年，该公司制造的 180MW 循环流化床锅炉在加拿大 Nova Scotia 动力公司投运， $3 \times 235\text{MW}$  循环流化床锅炉也于 1998 年在波兰 Turow 电厂安装，2000 年 5 月投入运行。另外三台容量相当但采用了紧凑型设计技术的 FW 型循环流化床锅炉正在该厂安装。2002 年，F.W. 公司制造的 2 台 300MW 循环流化床锅炉在美国佛罗里达州的 Jacksonville 投运，成为目前世界上投运的最大容量的循环流化床电站锅炉。

FW 型循环流化床锅炉的结构特点为：采用汽冷旋风分离器和 INTREX 热交换器，用流化风控制循环灰流量，INTREX 内只布置过热器，尾部采用平行双烟道，保证低负荷时

再热气温。图 0-4 是美国 F.W. 公司制造的带有方形汽冷旋风分离器的紧凑型 CFB 锅炉。图 0-5 是 F.W. 公司制造的 300MW 循环流化床锅炉，该锅炉安装在美国佛罗里达州杰克逊威尔市 JEA 电力公司的 Northside 电站，两台 300MW CFB 锅炉分别于 2001 年和 2002 年投入商业运行。图 0-6 是 F.W. 公司设计制造的 460MW 超临界循环流化床锅炉。该锅炉已于 2003 年 3 月在波兰（PKE, ELEKTROWNIA LAGISZA 电站）开工建设，计划于 2006 年 12 月 31 日投入商业运行。

F.W. 公司的 CFB 锅炉制造技术也曾向其他锅炉制造厂转让。我国东方锅炉（集团）股份有限公司等锅炉制造厂就购买了 F.W. 公司的 CFB 锅炉设计和制造技术。

#### 5. 美国巴威（Babcock&Wilcox）公司开发的内循环型循环流化床锅炉

美国巴威公司的内循环炉型的特点

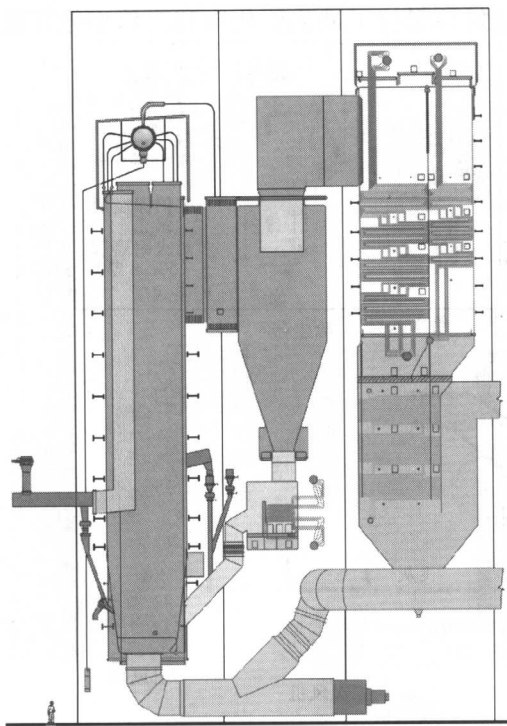


图 0-5 F.W. 公司制造的 300MW 循环流化床锅炉



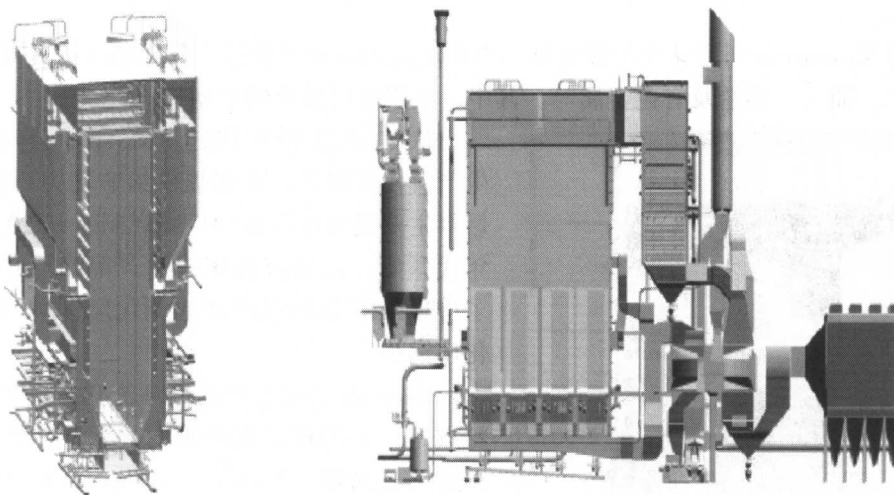


图 0-6 F.W. 公司设计制造的 460MW 超临界循环流化床锅炉示意图

是：采用高速床和两级分离器。在炉膛出口前后的高温区装有两组槽型（惯性）分离器作为第一级分离，而分离下来的飞灰将在炉膛内部形成循环。据介绍，其累计分离效率可达 97.5%。在锅炉尾部省煤器之后还有一多管（旋风）分离器作第二次分离。这种锅炉的结构相对简单，布置更接近传统的煤粉锅炉，不仅锅炉整体紧凑、简单，而且也更便于采用传统锅炉成熟可靠的受热面结构。目前，最大容量内循环型循环流化床锅炉是装在美国宾夕法尼亚州的燃用高灰分煤的 210t/h 高压循环流化床锅炉。图 0-7 是美国巴威公司生产的内循环型循环流化床锅炉。

这种 CFB 锅炉由于没有体积较为庞大的外置式高温旋风分离器，因此尾部烟道与炉膛之间的水平间距接近普通煤粉锅炉；此外，这一特点使该锅炉技术可方便地应用于普通煤粉锅炉的升级改造（煤粉炉改循环流化床锅炉）上。

由于气流进入第一级分离器是沿整个炉膛宽度进行的，因此炉内烟气流动均匀。此外，由于不含耐火材料、膨胀节、中心筒、回料阀等易磨损部件，因此有较高的可靠性和免维护性。所用耐火材料比常规水冷分离器 CFB 锅炉少 40% ~ 50%，比绝热式旋风分离器 CFB 锅炉少 80% ~ 90%。

6. 英国 Kaverner 公司的 MYMIC 型循环流化

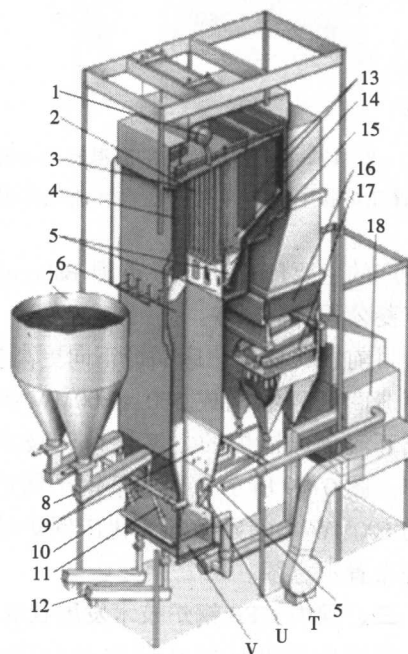


图 0-7 巴威 (B&W) 公司制造的内循环型 CFB 锅炉

1—汽包；2—炉内槽型分离器；3、5、9—水冷耐火层；4—蒸发屏；6—分隔；7—煤仓；8—重力给煤机；10—二次风喷嘴；11—给煤槽；12—冷渣器；13—过热器；14—外槽型分离器；15—飞灰斗；16—省煤器；17—多管旋风分离器；18—管式空气预热器

## 床锅炉

英国 Kaverner 公司是一个年营业额达 100 亿美元的跨国集团。其核心业务是纸浆、造船、加工、油气、建造及有色金属等。其中，纸浆部门涉及锅炉制造。

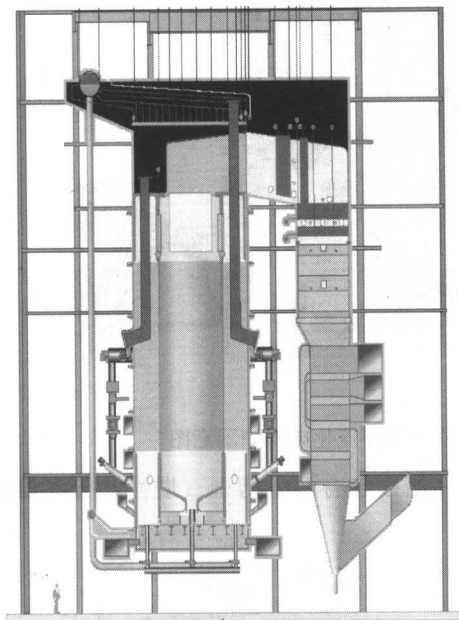


图 0-8 Kaverner 公司生产的高温旋风分离器布置在炉膛中心的 MYMIC 型循环流化床锅炉

从 20 世纪 70 年代起，Kaverner 公司就开始生产流化床锅炉，主要提供给非动力行业使用，燃料主要是树皮等各种生物燃料；从 20 世纪 80 年代开始，在其流化床锅炉产品目录中，出现了单独或部分燃煤的鼓泡流化床锅炉和循环流化床锅炉。

Kaverner 公司生产的循环流化床锅炉的最大特点是：采用布置在炉膛内的水冷或汽冷的高温旋风分离器，炉内高温烟气从其周边切向进入旋风分离器，分离下来的固体颗粒沿周边均匀地返回炉膛内，如图 0-8 所示。

这种高温旋风分离器的布置方式，使炉内烟气和床料运动更为均匀，并在一定程度上减轻了对高压二次风射程的要求。

Kaverner 公司也生产常规的带有外置式汽冷旋风分离器的循环流化床锅炉。其设计特点之一是：在高温循环灰回路上不设置任何膨胀节。

此外，国外从事循环流化床锅炉研制开发与生产的主要厂商还有：英国 Babcock 公司、美国 F.N. 公司、百威公司、CPC 公司、日本三菱公司等。

目前，循环流化床锅炉正向更高参数、更大容量的方向发展。国外多家循环流化床锅炉制造商已相继完成 500 ~ 600MW 级超临界循环流化床锅炉的方案设计和技术准备工作。图 0-9 所示为国外某锅炉制造商开发的 600MW 超临界循环流化床锅炉结构及系统布置示意图。

### 三、国内 CFB 锅炉技术发展状况

我国小型循环流化床锅炉应用较多，大多分布在化工、纺织、热电等企业，基本上没有加石灰石脱硫，可见其早期发展并非环保因素。早期的开发研制主要由高等院校及相关科研单位与国内锅炉制造厂合作进行。至 20 世纪 80 年代末 90 年代初，已有一批 35、75t/h 各种型式的循环流化床

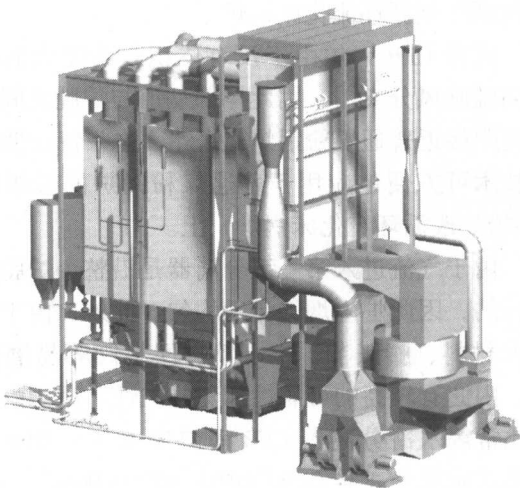


图 0-9 超临界循环流化床锅炉布置示意图