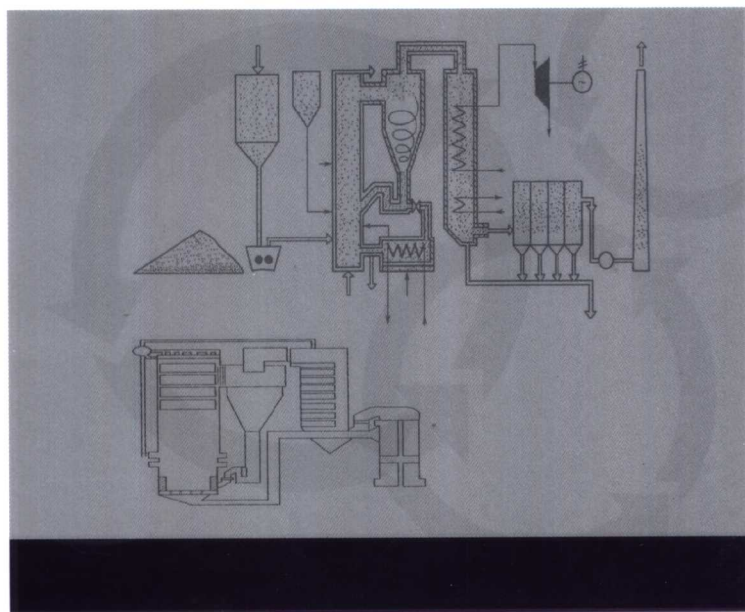


林宗虎 魏敦崧 安恩科 李茂德 编著

# 循环流化床锅炉



Chemical Industry Press

 化学工业出版社

# 循环流化床锅炉

林宗虎 魏敦崧 安恩科 李茂德 编著



化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

循环流化床锅炉/林宗虎等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2004. 2  
ISBN 7-5025-5157-3

I. 循… II. 林… III. 流化床-循环锅炉  
IV. TK229. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 005758 号

---

**循环流化床锅炉**

林宗虎 魏敦崧 安恩科 李茂德 编著

责任编辑: 陈丽 管德存

文字编辑: 王清颖

责任校对: 陈静

封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 17½ 字数 309 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5157-3/TH·180

定 价: 28.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

我国化石燃料储量中以煤炭为主，目前，我国煤炭消费占一次能源消费的比例高达75%，环境污染严重且用能效率较低。据专家预测，即使到2050年，我国一次能源的供应仍将以煤炭为主，煤炭消费仍将占一次能源消费的50%以上。因此，如何高效洁净地利用煤炭已成为我国近50年乃至上百年能源利用过程中的关键问题。

锅炉是重要耗煤设备，为了节煤和改善环境，燃煤锅炉在发展过程中急需解决的问题主要为：提高锅炉效率或电站发电效率；发展清洁有效和煤种适用性广的燃烧方法。

循环流化床锅炉与采用其他燃煤方式的锅炉相比具有锅炉效率高、脱硫效果好、氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）排放量低和燃料适用性广等优点，因而是国内外现阶段重点研究开发的有发展前途的高效洁净燃烧的燃煤锅炉。如果将循环流化床锅炉设计成增压高蒸汽参数锅炉并采用蒸汽-燃气联合发电循环，则不仅可使环保要求达到标准值、电站体积大为缩小，而且可显著提高发电效率。

本书对燃煤循环流化床锅炉的工作原理、设计方法、流动特性和传热传质特性作了重点扼要的论述并对其排烟中污染物质的形成和控制以及灰渣处理方式进行了介绍。最后，还对其发展趋势作了探讨和展望。

本书作者为林宗虎教授（第一章、第三章第一节至第三节和第八章）、魏敦崧教授（第四章）、安恩科副教授（第二章、第三章第四节至第六节）和李茂德副教授（第五章至第七章）。

循环流化床锅炉是一种新型锅炉，其理论和应用仍在不断研究和发展中，限于作者水平，书中可能存在一些错误和不足，恳请读者批评指正。

作者

2003年12月于同济大学

## 内 容 提 要

循环流化床锅炉是一种新型有发展前途的高效洁净燃烧的燃煤锅炉。本书共八章，对燃煤循环流化床锅炉的工作原理、设计方法、流动特性和传热传质特性做了重点扼要地论述，并对其排烟中污染物质的形成和控制以及灰渣处理方式进行了介绍，最后还对其发展趋势做了探讨和展望。

本书由国内该领域的知名专家林宗虎院士、魏敦崧教授、安恩科副教授和李茂德副教授等人编写。在注重介绍理论的同时与实际情况紧密结合，对循环流化床锅炉国内外的应用、发展趋势均有涉及，实用性强，参考价值较高。

本书适用于热能工程、环境工程的研究、设计人员参考，也可供大、专院校相关专业师生参考阅读。

# 目 录

<b>第一章 循环流化床锅炉的工作原理及主要类型</b> .....	1
<b>第一节 锅炉及其燃烧方式</b> .....	1
一、火床燃烧方式.....	1
二、火室燃烧方式.....	1
三、流化床燃烧方式.....	1
<b>第二节 循环流化床锅炉的工作原理和特点</b> .....	2
一、循环流化床锅炉的工作原理.....	2
二、循环流化床锅炉的特点.....	3
<b>第三节 循环流化床锅炉的主要类型</b> .....	6
一、按分离器工作温度分类.....	6
二、按分离器结构型式分类.....	10
三、按有无外置式换热器分类.....	12
四、按物料循环倍率分类.....	13
五、按固体物料循环方式分类.....	14
六、按炉膛压力分类.....	14
七、按工质蒸汽压力分类.....	15
八、按锅炉水循环的方式分类.....	15
<b>第二章 煤粒在流化床内的燃烧过程</b> .....	16
<b>第一节 煤粒在流化床内的破碎过程</b> .....	17
<b>第二节 煤中挥发分析出与燃烧</b> .....	18
一、化学反应动力学热解模型.....	20
二、综合传热传质热解模型.....	22
<b>第三节 焦炭燃烧</b> .....	27
一、单颗粒焦炭燃烧模型.....	27
二、焦炭的燃烧理论.....	29
三、燃料的燃烧特性指数.....	33
四、炭粒表面灰层的扩散特性.....	35
<b>第四节 循环流化床的燃烧特性</b> .....	37
<b>第五节 物料循环对锅炉燃烧特性的影响</b> .....	38

第六节	物料循环倍率的选择 .....	39
<b>第三章</b>	<b>循环流化床锅炉主要部件的设计计算 .....</b>	<b>41</b>
第一节	循环流化床锅炉的燃烧产物、热平衡和质量平衡 .....	41
一、	循环流化床锅炉的燃烧计算 .....	41
二、	循环流化床锅炉的热平衡 .....	45
三、	循环流化床锅炉的质量平衡 .....	49
第二节	炉膛的设计计算 .....	50
一、	炉膛的主要热力参数 .....	50
二、	炉膛尺寸的确定 .....	53
三、	炉膛开孔 .....	61
四、	炉膛受热面结构 .....	63
第三节	外置式换热器和对流受热面设计计算 .....	63
一、	外置式换热器设计计算 .....	63
二、	对流受热面设计计算 .....	66
第四节	循环流化床的高温分离装置 .....	67
一、	分离器效率对循环流化床运行的影响 .....	68
二、	分离器的类型 .....	69
三、	惯性分离器 .....	72
四、	高温旋风分离器 .....	76
五、	多级分离 .....	94
第五节	固体物料的回料装置 .....	95
一、	回料装置的作用及分类 .....	95
二、	回料阀的工作原理 .....	96
三、	气力输送阀的工作原理 .....	98
四、	固体颗粒循环回路的压力平衡 .....	98
五、	循环物料量的测量方法 .....	99
六、	回料阀的试验研究 .....	101
七、	立管的设计计算 .....	105
八、	回料阀的设计计算 .....	107
第六节	布风装置的设计 .....	108
<b>第四章</b>	<b>循环流化床锅炉的床内流动特性 .....</b>	<b>113</b>
第一节	流态化的状态及其特征 .....	113
一、	流态化现象 .....	113
二、	流化床的不同流型 .....	113

三、颗粒的基本特性和分类	115
四、流化床的床层压降与流化速度	120
五、自由空域内颗粒的扬析与夹带	126
第二节 循环流化床的下部流动特性	129
一、循环流化床流动的基本特征	129
二、鼓泡流化床的气固流动	131
三、湍流流化床的气固流动	136
四、循环流化床下部的颗粒运动规律	137
第三节 循环流化床的上部流动特性	139
一、循环流化床的流型转变	139
二、循环流化床上部的气固流动特征	140
三、气固混合及停留时间分布	150
四、循环流化床气固流动数学模型	155
<b>第五章 循环流化床锅炉的床内传热特性</b>	162
第一节 循环流化床内传热的数学模型	164
一、颗粒团传热模型	164
二、稀相区传热模型	166
三、宽筛分传热模型	168
四、床层与埋管之间的换热计算	171
五、理想有效传热系数求解模型	173
第二节 循环流化床下部密相区传热特性分析	175
一、传热机理	175
二、主要影响因素及其规律	180
三、密相区传热系数的关联式	183
第三节 循环流化床上部稀相区传热特性分析	188
一、传热机理	188
二、主要影响因素	189
三、稀相区传热系数的实验关联式	191
<b>第六章 循环流化床锅炉排烟中有害物质的形成及其影响因素</b>	194
第一节 循环流化床锅炉污染物质排放控制标准	194
第二节 $\text{SO}_x$ 的形成及特性	197
一、硫氧化物的基本性质	197
二、 $\text{SO}_x$ 的生成机理	197
三、各种因素对 $\text{SO}_x$ 形成的影响	199



第三节	SO <sub>x</sub> 的脱除	200
一、	预脱除法	200
二、	炉内燃烧过程脱硫	203
三、	烟气中 SO <sub>x</sub> 脱除法	204
四、	环流化床床内脱硫的影响因素	210
五、	SO <sub>3</sub> 的控制	211
第四节	NO <sub>x</sub> 的形成及特性	213
一、	氮氧化物 NO <sub>x</sub> 的基本来源	213
二、	NO <sub>x</sub> 的生成机理	214
三、	N <sub>2</sub> O 的生成机理	217
第五节	NO <sub>x</sub> 的脱除和控制技术	219
一、	NO <sub>x</sub> 的炉内控制与脱除	219
二、	排烟中 NO <sub>x</sub> 脱除和净化	222
三、	N <sub>2</sub> O 产物的控制和脱除	225
<b>第七章</b>	<b>循环流化床锅炉的灰渣处理</b>	<b>228</b>
第一节	灰渣的物理化学特性	228
第二节	循环流化床灰渣的环保特性	232
一、	灰渣渗滤对环境的影响	233
二、	放射性的影响	237
第三节	循环流化床灰渣的综合利用	240
一、	水泥行业的应用	240
二、	用作填充料	241
三、	建材行业的应用	242
四、	在农业方面的应用	243
五、	回收多种重金属元素	244
<b>第八章</b>	<b>循环流化床锅炉的发展趋向</b>	<b>245</b>
第一节	能源利用的进展及其对燃煤锅炉的影响	245
一、	国外能源利用的进展	245
二、	我国能源利用的进展	246
三、	能源利用对燃煤锅炉发展趋势的影响	247
第二节	循环流化床锅炉的发展过程及趋向	249
一、	国外循环流化床锅炉的发展过程	249
二、	我国循环流化床锅炉的发展过程	251
三、	循环流化床锅炉的发展趋势	252

第三节 循环流化床电站锅炉的发展趋势.....	252
一、锅炉容量的发展趋势.....	253
二、蒸汽参数的发展趋势.....	256
第四节 循环流化床在蒸汽-燃气联合循环发电系统中的 应用及发展趋势.....	257
一、蒸汽-燃气联合循环发电系统的布置形式 .....	257
二、常压循环流化床锅炉在系统中的应用和发展趋势.....	259
三、增压循环流化床锅炉在系统中的应用和发展趋势.....	261
参考文献.....	266

# 第一章 循环流化床锅炉的工作 原理及主要类型

## 第一节 锅炉及其燃烧方式

锅炉是一种利用燃料等能源的热能或工业生产中的余热，将工质加热到一定温度和压力的换热设备。以燃煤为主的固体燃料锅炉中，固体燃料主要以火床燃烧、火室燃烧和流化床燃烧三种燃烧方式在锅炉燃烧室（炉膛）中燃烧。

### 一、火床燃烧方式

在火床燃烧锅炉中，平均直径为 6~40mm 的煤粒在火床（炉排）上燃烧。炉排下方送入的空气速度不高，以免使煤粒在火床上燃烧时被风吹走。属于这种燃烧方式的锅炉有固定炉排锅炉、活动手摇炉排锅炉、抛煤机倒转炉排锅炉、振动炉排锅炉、下饲式炉排锅炉和往复推饲炉排锅炉等。

### 二、火室燃烧方式

在燃煤的火室燃烧锅炉中，煤块在磨煤机中被磨碎成颗粒平均直径为 0.02~0.08mm 的煤粉，再用空气将煤粉送入布置在炉膛炉墙上的燃烧器，使之喷入炉膛着火燃烧。煤粉在炉膛中呈悬浮燃烧，在炉膛停留时间很短，因而炉膛内气速较高，可达 6m/s 及以上。煤粉燃尽后随烟气逸出炉膛进入锅炉尾部受热面，最后其灰粒经除尘器等设备除尘后排出锅炉。燃煤的火室燃烧锅炉通常称为煤粉炉。

### 三、流化床燃烧方式

#### 1. 鼓泡流化床燃烧方式

在流化床燃烧锅炉中，煤被破碎机破碎成小于 6mm 的煤粒后加入燃烧室。燃烧室底部布置有多孔布风板，自布风板下方送入的空气流速较高。当气速高到临界流化速度时，即在此气速下气流对煤粒作用的曳力和浮力之和恰好与煤粒质量平衡时，煤粒即呈类似流体的状态。位于布风板上的颗粒床层开始流化和膨胀，达到所谓临界流化状态。

气速再增大，床层中会发生大量鼓泡现象。床层内出现由含颗粒稀少的气泡相和含颗粒众多的乳化相组成的两相状态。床层搅动强烈但仍有明显的呈波动的床层分界面。煤粒在布风板上方一定的炉膛高度内上下翻腾燃烧。新加入的煤粒进入数量比自身大数十倍的沸腾层中迅速着火燃烧。燃尽的灰渣由布置

在炉膛中的溢流口或冷渣口排出炉外。这种流化床燃烧锅炉通常被称为鼓泡流化床锅炉，其炉膛气速一般为  $1.5 \sim 2.0 \text{m/s}$ 。

## 2. 循环流化床燃烧方式

在鼓泡床中进一步增大气速（气流速度），则床层将进一步膨胀。当气速超过平均粒径的颗粒终端速度时，大量颗粒会被气流带出床层，在整个炉膛空间内燃烧并随气流逸出炉膛（终端速度也称带出速度，是指颗粒在气体对其作用的曳力和浮力以及自身重力的合力作用下，最终达到的颗粒稳定速度）。在颗粒分布方面，炉膛上部为浓度较均匀的稀相区，下部为密相区。炉膛中心区的颗粒与气流垂直向上流动，四周环形区则存在颗粒反流。炉膛上部和下部的颗粒浓度差别比鼓泡流化床明显减少。这种流化床燃烧方式被称为快速流化床燃烧。

为了维持快速流化床的流动工况，必须将大量流出炉膛的颗粒收集后与新加入的煤粒按一定比例同时送回快速流化床内循环使用。为此，在快速流化床锅炉的炉膛出口需装有一个分离器，使烟气和颗粒分离，将烟气送入锅炉尾部烟道。而分离出来的颗粒则由管道再送回炉膛循环使用。这种快速流化床燃烧锅炉通常被称为循环流化床燃烧锅炉或简称为循环流化床锅炉。其炉膛内气速一般为  $4 \sim 8 \text{m/s}$ 。

## 第二节 循环流化床锅炉的工作原理和特点

### 一、循环流化床锅炉的工作原理

图 1-1 所示为典型电站用循环流化床直流锅炉的工作系统，其基本工作过程如下。煤由煤场经抓斗和运煤皮带等传输并加入燃料仓，然后由燃料仓进入煤破碎机被破碎成粒径小于  $6 \text{mm}$  的煤粒后加入炉膛。与此同时，用于燃烧脱硫的脱硫剂石灰石也由石灰石仓加入炉膛，参与煤粒燃烧反应过程。炉内温度因受脱硫最佳温度的限制，一般保持在  $850^\circ\text{C}$  左右。此后，随烟气流出炉膛的大量颗粒在旋风分离器中与烟气分离。分离出来的颗粒可以直接回入炉膛，也可经外置式换热器进入炉膛再次参与燃烧过程。由旋风分离器分离出来的烟气则被引入锅炉尾部烟道，对布置在尾部烟道中的过热器、省煤器和空气预热器中的工质加热后经布袋除尘器除尘后，由引风机排入烟囱，流入大气。

在汽水系统方面，给水由给水泵压入省煤器吸热后流入布置在炉膛四周的水冷壁。工质在水冷壁中吸热汽化后流入位于对流烟道的过热器，并在其中进一步被烟气加热到规定的过热蒸汽温度和过热蒸汽压力。随后，过热蒸汽流入汽轮发电机组推动汽轮机带动发电机组发电。

外置式换热器中的被加热工质可以是给水或蒸汽。这些工质在外置式换热

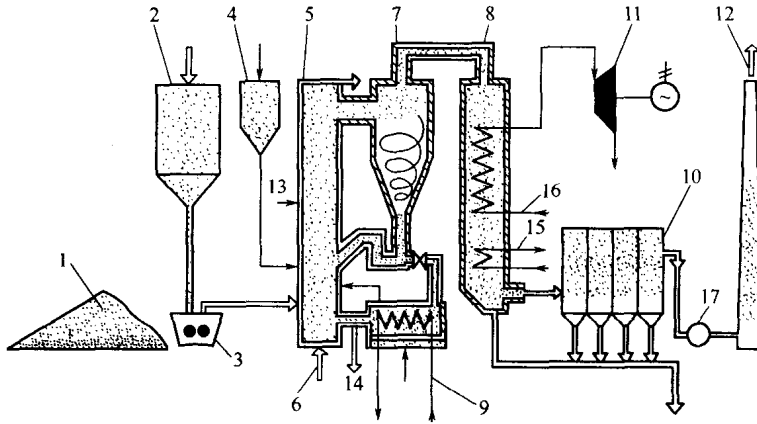


图 1-1 典型电站用循环流化床直流锅炉的工作系统

- 1—煤场；2—燃料仓；3—燃料破碎机；4—石灰石仓；5—水冷壁；  
 6—布风板底下的空气入口；7—旋风分离器；8—锅炉尾部烟道；  
 9—外置式换热器的被加热水质入口；10—布袋除尘器；11—汽轮  
 发电机组；12—烟囱；13—二次空气入口；14—排渣管；  
 15—省煤器；16—过热器；17—引风机

器中吸热后仍回入锅炉的汽水系统。

燃烧及布风需要的一次风和二次风通常由冷空气在空气预热器（布置在后部烟道的省煤器后面，图中未示出）中预热后分别从炉膛底部及炉膛侧墙送入。

## 二、循环流化床锅炉的特点

循环流化床锅炉的循环流化燃烧方式与采用其他燃烧方式的锅炉相比具有的主要特点可归纳如下。

### 1. 可燃用的燃料范围宽

循环流化床锅炉炉膛中存在大量由固体颗粒构成的床料。这些炽热的固体颗粒可以是沙子、砾石、石灰石及煤灰。加入的燃料按质量分数计算只占床料总量的1%~3%。

循环流化床是快速床，不存在鼓泡床工况中出现的气泡。乳化相弥散形成颗粒团，颗粒团被上升气流打散成细颗粒，再被气流带着向上流动。在流动过程中，细颗粒又聚集成颗粒团。由于颗粒团质量大、体积大，一般沿炉壁四周沉降。在沉降时，由于与气流间的相对速度增大，又被上升气流打散成细颗粒，再次被气流带动向上运动。如此周而复始，在炉膛形成一个中心区气流与细颗粒向上运动而四周近壁环形区颗粒团向下沉降的强烈内循环运动。加上随烟气流出炉膛的高温固体颗粒被分离捕集后再次送回炉膛的外循环作用，使炉膛内传热和传质过程得到显著强化。炉膛内温度能均匀地保持在850℃左右，

加入炉膛的燃料颗粒迅速加热到炉膛温度并着火燃烧。因而循环流化床锅炉可以不需辅助燃料，而燃用各种固体燃料，从低挥发物的无烟煤到高硫烟煤乃至灰分含量高达40%~60%的高灰煤均可满意地燃烧。此外，这种锅炉还能燃用石油焦、页岩等其他固体燃料，其燃料适用范围十分宽广。

### 2. 燃烧效率高

在锅炉的各种燃烧方式中，火床燃烧的燃烧效率一般为85%~90%，鼓泡流化床燃烧的燃烧效率为90%~96%，而煤粉火室燃烧因其燃料颗粒特细可以达到99%的燃烧效率。循环流化床燃烧时，虽然其燃料颗粒比煤粉粗数十倍乃至上百倍，但其燃烧效率仍可高达97%~99%。在设计 and 运行良好的情况下，其燃烧效率可以达到煤粉炉的水平。

循环流化床锅炉能保持燃烧效率高的主要原因如下。首先新鲜燃料颗粒进入炉膛迅速与大量炽热床料混合，可立即着火燃烧，而且炉内气固混合强烈，燃烧速率高。此外，在这种锅炉中，燃烧区域扩展到整个炉膛，随气流流出炉膛的未燃尽颗粒会被旋风分离器分离后再送回炉膛循环燃烧，因而使燃料燃烧时间大为延长，有利于燃料燃尽。当然，也有一些细颗粒未被旋风分离器收集，并随烟气流入锅炉尾部受热面烟道，造成一些燃烧损失。为了降低这部分燃烧损失，可以在锅炉尾部烟道底部收集这些细颗粒并送回炉膛参加燃烧。

在鼓泡床燃烧锅炉中，燃料主要在炉膛中不高的床层高度区域中燃烧，燃烧时间较短。此外，细颗粒易被气流带出床层和燃烧室造成一定燃烧损失。因而其燃烧效率比循环流化床锅炉的低。

### 3. 脱硫效果好

燃煤锅炉的主要缺点之一即为排烟中含有在燃烧过程中产生的大量SO<sub>2</sub>气体。含有SO<sub>2</sub>的烟气排入大气后将严重污染环境。为了减少烟气中的SO<sub>2</sub>含量，并使之达到环保要求，往往需要采用价格昂贵的烟气脱硫装置，或在燃烧过程中加入脱硫剂（吸收剂）脱硫。常用的脱硫剂为石灰石（CaCO<sub>3</sub>）和白云石（CaCO<sub>3</sub>·MgCO<sub>3</sub>）。

燃用煤粉锅炉在采用石灰石脱硫剂脱硫时一般将粒径为8~10μm的石灰石直接喷入炉温为1100~1300℃的炉膛区域。为了表明脱硫时所需消耗的CaCO<sub>3</sub>量，采用了一个钙硫的摩尔比值Ca/S作为综合指标，来表明脱硫时钙的有效利用率。石灰石等脱硫剂在参与燃烧过程中很快就煅烧成多孔的氧化钙粒，然后与烟气中的SO<sub>2</sub>进行缓慢的形成CaSO<sub>4</sub>的氧化钙硫酸盐化的脱硫过程。在煤粉锅炉中，由于脱硫剂在炉膛有效脱硫温度范围内停留时间很短，仅零点几秒到几秒，并且脱硫温度不在最佳温度850℃，因而脱硫效率不高。在以石灰石为脱

硫剂，Ca/S 值为 2 时，脱硫效率低于 50%。脱硫剂利用率低于 20%。

在鼓泡床燃烧锅炉中，脱硫剂平均粒径一般为 1mm 左右，脱硫剂在床层中因翻腾燃烧，其平均停留时间比煤粉锅炉大为延长，并且能在最佳反应温度下脱硫。因而脱硫效率高于煤粉锅炉。在采用石灰石为脱硫剂，Ca/S 值为 2 时，其脱硫效率可达 80%。但脱硫剂中的细颗粒在床层停留时间很短，即被烟气带出炉膛而不能得到充分回收利用，造成脱硫剂损失。

在循环流化床锅炉中，脱硫剂在炉膛中是在最佳反应温度下进行脱硫，炉膛中燃料和物料的内循环运动和分离设备、回送设备造成的外部循环使脱硫剂在炉膛内平均停留时间可长达数十分钟，因而脱硫过程可充分进行。流出炉膛的脱硫剂细颗粒也可通过外部循环仍送回炉膛参加脱硫反应。此外，加入循环流化床锅炉的脱硫剂颗粒平均粒径为 0.1mm，其反应面积在脱硫剂量相同情况下要比鼓泡流化床锅炉脱硫剂的颗粒大得多。因而在采用石灰石作脱硫剂，Ca/S 为 2 的情况下，其脱硫效率可高达 90% 以上，脱硫剂利用率可达 50% 以上。排入大气的烟气中 SO<sub>2</sub> 含量（标准状态）小于 200mg/m<sup>3</sup>，符合国家环保标准，可不必采用昂贵的烟气脱硫装置。

#### 4. 氮氧化物 NO<sub>x</sub> 排放量低

锅炉排烟中另一种危害环境的物质为氮氧化物 NO<sub>x</sub>。烟气中的 NO<sub>x</sub> 按其生成机理可分为热力型 NO<sub>x</sub>、快速型 NO<sub>x</sub> 和燃料型 NO<sub>x</sub> 三类。

热力型 NO<sub>x</sub> 是燃烧用空气中所含的 N<sub>2</sub> 在高温时氧化生成的。快速型 NO<sub>x</sub> 是燃料燃烧分解时所产生的中间产物与 N<sub>2</sub> 反应生成的。燃料型 NO<sub>x</sub> 是燃料中所含有机氮化合物在燃烧时氧化生成的。

在燃煤锅炉中，快速型 NO<sub>x</sub> 占总 NO<sub>x</sub> 含量的比例较少，一般在 5% 以下。因此主要为热力型 NO<sub>x</sub> 和燃料型 NO<sub>x</sub>。研究表明，燃料型 NO<sub>x</sub> 和热力型 NO<sub>x</sub> 均与燃烧温度密切相关。燃烧温度愈高则这两种类型的 NO<sub>x</sub> 含量愈大，反之则愈小。特别是热力型 NO<sub>x</sub> 受燃烧温度影响更明显。煤粉锅炉的炉膛温度在 1300℃ 以上，因而其 NO<sub>x</sub> 排放浓度一般为  $(400 \sim 600) \times 10^{-6}$ 。循环流化床锅炉的炉膛温度为 850℃ 左右，此时热力型 NO<sub>x</sub> 生成量已较少，一般只占 NO<sub>x</sub> 总排放量的 10% 以下。加上循环流化床锅炉燃烧所需空气采用分段给入方式，一次风从布风板下送入，由于其量低于燃烧化学当量，因而析出的燃料所含的氮不能充分与氧反应生成氧化氮。过量空气（为 20%）的二次风在炉膛下部还原区以上送入炉膛，此时燃料析出的氮已成为分子氮，因而也不易形成 NO<sub>x</sub>。由于合理组织了分段送风和分段燃烧，可以有效地减少燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成。因而循环流化床锅炉烟气中的 NO<sub>x</sub> 排放浓度一般为  $(50 \sim 150) \times 10^{-6}$ ，可以满足各国的环保法规要求。

#### 5. 炉膛截面热负荷高，有利于发展大容量锅炉

循环流化床锅炉的炉膛气速是鼓泡流化床锅炉的3~5倍，炉内混合强、传热快，其炉膛截面热负荷也远大于鼓泡流化床锅炉，一般为3~5MW/m<sup>2</sup>，可达到与煤粉锅炉相当的水平。与鼓泡流化床相比，炉膛横截面积小得多，炉膛紧凑，有利于锅炉向大型化发展。

#### 6. 燃料进给口较少

在热功率相同的情况下，由于循环流化床锅炉炉膛截面积小、炉内混合良好及燃烧区域的扩展，其燃料进给点要比底部进给燃料的大型鼓泡床锅炉的燃料进给口少得多，从而使燃料进给系统得以简化，有利于向大型锅炉发展。

#### 7. 锅炉出力调节范围广，调节速率快

鼓泡流化床锅炉要减少出力通常采用减少燃料量和空气量的方法。由于炉膛水冷壁吸热量不能按比例减少，因而会造成炉温下降并引起燃烧工况和脱硫工况恶化。在循环流化床锅炉中，可以通过减少进入外置式换热器的循环量使炉温升高。这样，就可补偿在低负荷时因燃料量和空气量的下降而引起的炉温降低，使炉温仍保持在最佳炉温运行工况。因而可使锅炉出力调节范围较宽，一般在锅炉正常出力的25%~30%下仍可稳定运行。此外，由于炉膛气速高、传热快，其出力调节速率较快，可达到4%/min的程度。

#### 8. 灰渣可进行多种综合利用

由于低温燃烧和燃烧效率高使循环流化床锅炉排出的灰渣未经熔化过程且含碳量小。但由于采用加入脱硫剂的炉内脱硫技术，其固体灰渣排出量一般是同容量煤粉锅炉的1.5~2倍。并且灰渣中含有大量的氧化钙和硫酸钙，不像煤粉锅炉灰渣以氧化硅为主。其灰渣可用于水泥掺和料、建筑材料和砖瓦生产等方面的综合利用。

循环流化床锅炉的一系列特点已使其逐渐发展为一种适用燃料范围广、高效低污染的燃煤锅炉，不仅适用于工业锅炉，也适用于大型电站锅炉，具有广泛的应用和发展前景。

### 第三节 循环流化床锅炉的主要类型

随着循环流化床锅炉的发展，出现了一系列具有不同结构特点和运行参数的循环流化床锅炉，可按如下方法分类。

#### 一、按分离器工作温度分类

分离器是循环流化床锅炉的一个重要部件，其作用是保证将大量固体物料从热烟气中分离出来，再送炉膛以维持循环流化床锅炉炉膛的循环流化床燃烧工况。根据分离器工作温度的高低，可将循环流化床锅炉分为采用高温分离器



的循环流化床锅炉、采用中温分离器的循环流化床锅炉和采用低温分离器的循环流化床锅炉。

### 1. 采用高温分离器的循环流化床锅炉

采用高温分离器的循环流化床锅炉，其分离器工作温度为 850~900℃，与炉膛温度基本相同。

图 1-2 所示为芬兰 Ahlstrom 公司生产的 Pyroflow 型带高温旋风分离器的循环流化床锅炉结构简图。图中，煤粒和石灰石分别由输入点加入炉膛，煤粒随即燃烧并释出热量，形成烟气和灰粒。燃烧产生的热量由布置在炉膛四壁的水冷壁和布置在炉膛上部的屏式过热器内的工质吸收，使炉膛温度保持 850℃ 左右的最佳脱硫温度。烟气夹带着物料流出炉膛后即进入高温旋风分离器使气体与固体物料分离。高温旋风分离器为无冷却的钢结构，内部设置有一层厚的耐火材料和隔热材料。与物料和烟气接触的里层由耐高温耐磨材料制成，以保证分离器能在 900℃ 时可靠地工作。分离器的分离效率可达 99%。由分离器分离出来的物料由回料管（料腿）送回炉膛循环使用。分离出来的烟气则由旋风分离器顶部流入尾部烟道，经对流过热器、省煤器和空气预热器吸热后流过除尘器再由烟囱排入大气。

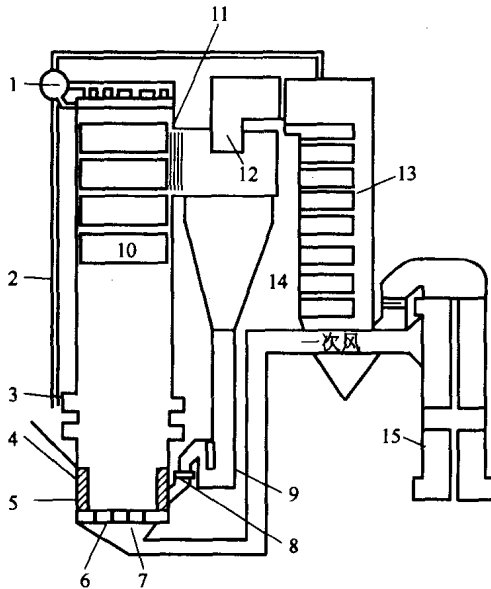


图 1-2 Pyroflow 型循环流化床锅炉结构简图

- 1—汽包；2—下降管；3—二次风；4—煤与石灰石输入处；5—卫燃带；  
6—布风板；7—一次风；8—料腿膨胀节；9—料腿；10—屏式过热器；11—炉膛出口；  
12—高温旋风分离器；13—对流过热器；14—省煤器；15—空气预热器