



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

循环流化床 锅炉设备

牛 勇 主 编
张立华 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
 职业教育电力技术类专业培训用书
 电力职业技术教育教学改革系列教材

要 要 容 内

循环流化床 锅炉设备

电力职业技术教育教学改革系列教材
 建设委员会

主 任 张效胜
 副主任 李启涛 张 伟
 委 员 杨立久 苏庆民 王庆民 王焕金
 杨新德 朱正堂 侯仰东 郭光宏
 高洪雨 孙奎明 蔡卫敏 马明礼

本书主编 牛 勇
 副 主 编 张立华
 编 写 廉根宽
 主 审 张 磊

行 发 出 社 业 教 育 职 业 中 国

100044 http://jc.cepp.com.cn

印 刷 公 司 中 国 电 力 出 版 社

各 地 分 销 处 均 有 代 售

2007年8月第1版 2007年8月北京第1次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.25印张 218千字

印 数 0001—3000册 定 价 12.00元

音 乐 告 白

本 社 承 办 各 类 书 刊 的 发 行 工 作 凡 有 需 求 者 请 垂 注 本 社 网 站 或 直 接 与 本 社 联 系



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

本书主要讲述循环流化床锅炉工作原理、炉内过程、主要设备及辅助设备、燃烧污染控制以及运行知识。

本书可作为职业技术学院相关专业的教材及参考书,也可作为炉型为CFB锅炉的各火力发电厂从事循环流化床工作人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉设备/张立华等编. —北京:中国电力出版社, 2007

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-6022-5

I. 循… II. 张… III. 流化床—循环锅炉—职业教育—教材 IV. TK229.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第130749号

责任编辑: 张立华
封面设计: 张立华
版式设计: 张立华
校对: 张立华
印刷: 张立华

中国电力出版社出版、发行

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

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007年8月第一版 2007年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.25印张 218千字

印数 0001—3000册 定价 15.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

我国能源消费以燃煤为主。近年来,我国一次能源消费结构中,煤炭所占的比例一直保持在74%以上,煤炭燃烧所造成的环境污染,已成为我国乃至国际上非常关注和迫切解决的重大问题。循环流化床燃烧技术是近年来发展起来的一种高效、低污染的洁净燃烧技术,是对传统的炉排炉和煤粉炉的一个重大革新。由于炉内物料具有大热容量、强混合和低温燃烧的特点,它可以有效燃用褐煤、烟煤和无烟煤,也可燃用残渣、石油焦等劣质燃料;在同一台锅炉上还可以同时燃用多个煤种,燃料适应性好;循环流化床燃烧可以通过添加石灰石,进行炉内烟气脱硫处理,为高硫煤的合理利用提供了捷径,因而在国内外得到了迅速发展,并进行商业推广。随着循环流化床锅炉在我国的广泛应用,从事循环流化床锅炉运行、安装、调试、管理等工作的人员队伍迅速扩大。近年来根据作者在对现场工作人员的培训中发现,由于循环流化床燃烧技术的发展和循环流化床锅炉形式的多样性,导致现场运行技术多变。因此他们迫切希望能够有一些适合自己的、全面介绍循环流化床锅炉的专业书籍。同时,由于发电行业循环流化床燃烧技术的应用,对于培养学生的学校也提出了要求,在教材的选用上必须拓宽,以适应新技术发展的需要和学生就业的需要。为此,作者在结合多年的科研、培训和教学经验的基础上编写了本书。本书主要作为大中专院校相关专业的教材及参考书和各火力发电厂从事循环流化床工作人员的培训教材。

本书重点讲述了循环流化床的基本概念和基本原理、燃烧设备、各辅助设备、有害气体的排放控制以及循环流化床运行知识。

本书绪论、第四、五、六章由张立华编写,第一、二、三章由牛勇编写,第六章的第六节由廉根宽编写。牛勇任主编,张立华任副主编。本书由山东省电力学校张磊主审。本书在编写过程采用了上海锅炉厂、东方锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、山东大学、山东济宁发电厂、山东运河发电厂的有关资料,在此表示衷心感谢。

循环流化床燃烧技术的理论及其应用正在发展,鉴于作者水平所限以及时间仓促,书中欠妥之处在所难免,希望读者批评指正。

编者

2007年7月

目 录

前言	
绪论	1
第一节 循环流化床锅炉 (CFB 锅炉) 的发展概况	1
第二节 循环流化床锅炉的原理、组成及类型	2
第三节 循环流化床锅炉的特点	5
第一章 循环流化床锅炉炉内过程	7
第一节 循环流化床锅炉的基本概念	7
第二节 循环流化床锅炉炉内流体动力特性	11
第三节 流化床内的燃烧	14
第四节 循环流化床气固两相流颗粒之间的传热	19
第五节 循环流化床下部密相区的传热	21
第六节 循环流化床稀相区传热	26
第二章 循环流化床锅炉的主要设备	29
第一节 燃烧室	29
第二节 布风装置	31
第三节 物料分离器	37
第四节 固体物料回送装置	47
第五节 点火装置	54
第六节 炉前碎煤、给煤设备及系统	55
第七节 风烟系统	60
第八节 除灰除渣系统及设备	64
第三章 循环流化床燃烧污染控制	72
第一节 大气污染物	72
第二节 流化床燃烧对烟尘及可燃气体的排放控制	73
第三节 煤燃烧过程中 SO_x 的生成机理	74
第四节 循环流化床燃烧过程中对 SO_x 的排放控制	76
第五节 煤燃烧过程 NO_x 的生成机理及排放控制	79
第六节 循环流化床燃烧过程中 N_2O 生成机理及排放控制	83
第七节 循环流化床燃烧污染排放的综合控制	85
第四章 典型循环流化床锅炉介绍	87
第一节 锅炉整体布置	87
第二节 芬兰 FWEQY 公司 Pyroflow 型循环流化床锅炉	87

第三节	德国鲁奇公司鲁奇型循环流化床锅炉	90
第四节	美国福斯特·惠勒公司 FW 型循环流化床锅炉	92
第五节	德国拔柏葛公司的 Circofluid 型循环流化床锅炉	96
第六节	东方锅炉厂自主开发大型 CFB 锅炉简介	97
第五章	循环流化床锅炉的运行	102
第一节	循环流化床锅炉的冷态试验	102
第二节	循环流化床锅炉的启动和停炉	105
第三节	循环流化床锅炉的运行调节	107
第四节	循环流化床锅炉运行中的常见问题及处理	111
第六章	上海锅炉厂 440t/h CFB 锅炉运行实例	117
第一节	锅炉简介	117
第二节	锅炉机组的启动	120
第三节	锅炉运行中的控制与调整	126
第四节	停炉及停炉后的保养	129
第五节	转动机械的运行	132
第六节	锅炉事故处理	133
参考文献		139
1	.....	第五章
2	.....	第六章
3	.....	第二章
4	.....	第一章
5	.....	第二章
6	.....	第三章
7	.....	第四章
8	.....	第五章
9	.....	第六章
10	.....	第七章
11	.....	第八章
12	.....	第三章
13	.....	第一章
14	.....	第二章
15	.....	第三章
16	.....	第四章
17	.....	第五章
18	.....	第六章
19	.....	第七章
20	.....	第四章
21	.....	第一章
22	.....	第二章

绪 论

第一节 循环流化床锅炉 (CFB 锅炉) 的发展概况

流化床燃烧 (Fluidized-bed combustion) 方式具有燃料适应性广、燃烧稳定、有害气体排放量少等一系列优点,自问世以来得到了迅速发展。流化床燃烧是介于层状燃烧和悬浮燃烧之间的一种燃烧方式,克服了二者的缺点,而保留了它们的优点,是一种很有竞争力和发展优势的洁净燃烧技术。下面简要介绍流化床锅炉的发展概况。

一、常规流化床锅炉

德国人弗里茨·温克勒 (Fritz Winkler) 于 1921 年建立了第一个小型流化床试验台,进行了流化床技术的试验研究,并申请了专利。至 20 世纪 40 年代,流化技术已广泛应用于各工业领域 (如石油、化工、冶炼、粮食、制药等),并大大提高了其技术水平和理论水平。

流化技术真正用于煤的燃烧始于 20 世纪 60 年代。英国人道各拉斯·埃利奥特 (Douglas Elliott) 于 20 世纪 60 年代初与英国煤炭利用研究协会和煤炭局一起开发研究流化床燃煤锅炉,几年之后第一台常规流化床锅炉 (即沸腾炉) 投入运行。1965 年我国第一台燃油页岩的流化床锅炉也在广东茂名投产成功,并在全国得到迅猛发展。但常规流化床锅炉还存在一些缺点和难以解决的问题,突出表现在:

- (1) 当燃用宽筛分煤时,飞灰可燃物含量大,降低了锅炉热效率;
- (2) 床内布置的埋管受热面磨损严重;
- (3) 锅炉大型化受到限制。尽管炉内燃烧热强度大 (可达 $1.5\text{MW}/\text{m}^2$),但要制造一台 $400\text{t}/\text{h}$ 的流化床锅炉,炉床面积将要达到 100m^2 以上,给设备布置带来很大困难;
- (4) 采用石灰石脱硫时,石灰石的钙利用率低。如果脱硫效率达 90% ,则钙硫比 Ca/S (摩尔比) 一般要在 3 以上,即石灰石耗量太大。

为解决上述问题,20 世纪 70 年代末、80 年代初,国外在总结和研​​究流化床锅炉 (Fluidized-bed) boiler 的基础上,开发研制出了循环流化床锅炉 (Circulating fluidized bed boiler, 简称 CFB 锅炉或者 CFBB)。

二、循环流化床锅炉 (CFB 锅炉)

通常把早期的流化床锅炉称作鼓泡床锅炉 (又称沸腾炉),即第一代流化床锅炉,而循环流化床锅炉称作第二代流化床锅炉,两者既有联系又有区别。

1979 年芬兰奥斯特龙 (Ahlstrom) 公司开发的热功率为 15MW 、由燃油改烧泥煤的循环流化床锅炉在皮拉瓦 (Pihlava) 建成并投入运行。由德国鲁奇 (Lurgi) 公司开发的第一台燃煤循环流化床锅炉于 1982 年在德国的鲁能 (Luenen) 投入运行,其热功率为 84MW 。美国拜特 (Battelle) 公司开发的 $25\text{t}/\text{h}$ CFB 锅炉于 1981 年投入运行。目前,循环流化床锅炉向大型化发电锅炉方向发展的步伐十分迅速,世界上运行的单台最大容量循环流化床锅炉发电机组已达 300MW 。

我国对循环流化床锅炉的研究和开发起步较晚。1982 年开始循环流化床燃烧技术的研究,1988 年第一台 $35\text{t}/\text{h}$ CFB 锅炉在山东明水电厂投产。但近几年来,国内在开发和研制

循环流化床锅炉技术方面发展迅猛,已经投运和正在建设的 100MW 等级的循环流化床锅炉已达几十台。由哈尔滨锅炉厂有限责任公司和西安热工研究院联合自主开发的、具有自主知识产权的 670t/h (200MW 机组) CFB 锅炉,已经于 2006 年 7 月 7 日在江西分宜电厂投入商业运行。世界上首台亚临界 300MW CFB 锅炉,已经于 2006 年 4 月 17 日通过 168h 满负荷试运并投入商业运行,它是由法国 ALSTOM 公司设计、制造的。我国的上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂已经联合引进了法国 ALSTOM 公司的亚临界 300MW CFB 锅炉制造技术,哈尔滨锅炉厂生产的首台 300MW CFB 锅炉安装在了云南开远电厂并投入运行,东方锅炉厂首台 300MW CFB 锅炉已经在秦皇岛热电厂进行安装,上海锅炉厂首台 300MW CFB 锅炉将安装在江西。由此看来,循环流化床锅炉已经在我国洁净发电领域处于优先发展的重要地位。

三、增压流化床锅炉

增压流化床锅炉的发展始于 20 世纪 70 年代初,20 世纪 80 年代中期向示范性电站阶段过度。目前世界上已投入运营的此类电站约有 8 座,最大容量已达 360MW,技术也日益完善和成熟。增压流化床锅炉是当今发展起来的煤洁净利用技术之一,具有极大的发展潜力。采用增压流化床燃煤联合循环 (PFBC-CC) 具有效率高、环保性能好、系统比较简单、占地面积小、可直接燃用原煤、煤种适应性广、运行方式与常规燃煤电站接近等优点。

增压流化床燃煤联合循环根据燃烧室的类型不同,分为增压鼓泡流化床联合循环和增压循环流化床联合循环。目前,前者为增压流化床燃煤联合循环实际应用的主流,而后者将成为未来增压流化床联合循环发展的方向。

在增压流化床燃烧技术发展过程中,瑞典 ABB 公司 (现为美国 ABB-CE 公司) 处于领先地位。

第二节 循环流化床锅炉的原理、组成及类型

一、循环流化床锅炉的基本工作原理

流化床燃烧是一种燃烧化石燃料、废物等燃料的燃烧技术,其基本工作原理是固体物料在流化状态下进行燃烧。一般地,粗颗粒在燃烧室下部燃烧、细颗粒在燃烧室上部燃烧,被吹出燃烧室的细颗粒由物料分离器捕捉、收集下来,经返料装置送回床内重新燃烧。

二、循环流化床锅炉的组成 (如图 0-1 所示)

1. 燃烧室

流化床锅炉的燃烧室以二次风入口为界分为两个区域。二次风入口以下为大颗粒还原气氛燃烧区,二次风入口以上为小颗粒氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧、脱硫等过程主要在燃烧区内完成,燃烧室内布置有水冷壁,有的还布置过热器或其他受热面,它完成大约 50% 燃料放热量的传递过程。因此流化床燃烧室既是一个燃烧设备、热交换器,也是一个脱硫、脱氮装置,是流化床燃烧系统的主体。

2. 物料分离器

物料分离器是循环流化床燃烧系统的关键部件之一,其作用是把由烟气带出炉膛的物料进一步分离出来,再通过返料装置送回炉膛内重新燃烧或者参与反应。

物料分离器的形式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的形式及紧凑性,其性能对燃烧室的

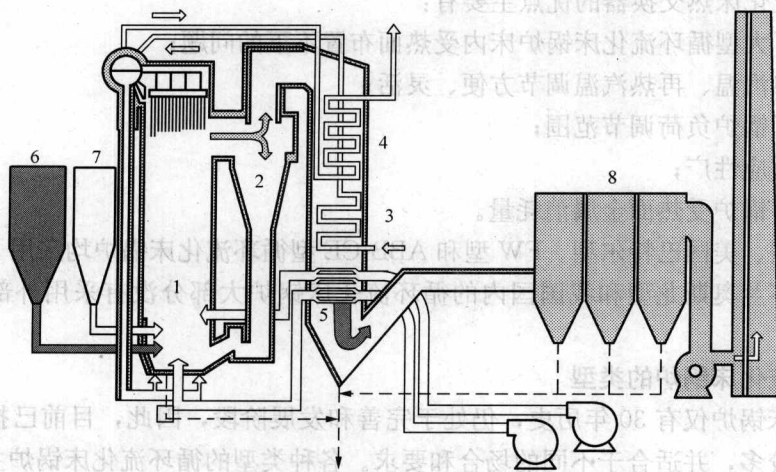


图 0-1 循环流化床锅炉示意图

1—燃烧室；2—物料分离器；3—省煤器；4—过热器；5—空气预热器；
6—煤仓；7—石灰石仓；8—电除尘器

动力特性、传热特性、飞灰循环、燃烧效率和出力，对石灰石的脱硫效果、对负荷的调节范围及锅炉启动时间等有重要影响。

国外普遍采用的物料分离器有高温耐火材料内砌的旋风分离器、水冷或汽冷旋风分离器、各种形式的惯性分离器和多管旋风分离器。国内采用的还有下排气中温旋风分离器、水冷旋风分离器、百叶窗惯性分离器、耐火材料内砌高温旋风分离器等。

高温耐火材料旋风分离器收集效率高、阻力较大、燃烧系统布置欠紧凑。下排气中温旋风分离器的收集效率较高、阻力较小，能使锅炉整体布置呈传统的 II 型布置，锅炉紧凑、占地面积小。综合考虑各因素，国内仍主要采用高温旋风分离器。

3. 物料回送装置

物料回送装置是循环流化床锅炉的重要部件之一，它的正常运行对燃烧过程的可控性、锅炉的负荷调节性能起决定性作用。

物料回送装置的作用是将物料分离器收集下来的物料回送到流化床内循环燃烧或者参与脱硫反应，且保证流化床内的高温烟气不经过回料器短路流入分离器。因此，回料器既是一个物料回送器，又是一个锁气器。如果这两个作用失常，将严重影响到燃烧室内的燃烧工况及锅炉出力。

循环流化床燃烧系统中常采用非机械式的物料回送装置。设计中采用的回料器有两种类型：一种是自动调整型回料器；另一种是阀型回料器。前者能随锅炉负荷自动改变回料量，而不需调整返料风量；后者则需调整回料风量。

4. 外部流化床热交换器

外部流化床热交换器的作用是使分离下来的物料，部分或全部（取决于锅炉运行工况和蒸汽参数）通过它并冷却到 500°C 左右，然后通过回料器送到床内再燃烧。外部流化床热交换器内的流化速度在 $0.3\sim 0.45\text{m/s}$ 范围内，布置的受热面可以是省煤器、蒸发器、过热器或再热器。外部流化床热交换器实质上是一个细颗粒鼓泡流化床热交换器，具有传热系数高、磨损小的优点。

采用外部流化床热交换器的优点主要有：

- (1) 解决了大型循环流化床锅炉床内受热面布置不下的问题；
- (2) 使过热汽温、再热汽温调节方便、灵活；
- (3) 增大了锅炉负荷调节范围；
- (4) 煤种适应性广；
- (5) 节约了锅炉受热面金属消耗量。

德国鲁奇型、美国巴特型、FW型和ABB-CE型循环流化床锅炉均采用了外部流化床热交换器，而芬兰奥斯龙型和我国国内的循环流化床锅炉大部分没有采用外部流化床热交换器。

三、循环流化床锅炉的类型

循环流化床锅炉仅有30年历史，仍处于完善和发展阶段，因此，目前已投运的循环流化床锅炉型式较多，并适合于不同的场合和要求。各种类型的循环流化床锅炉主要区别在分离器的类型和工作温度，以及是否设置外部热交换器等方面。

1. 按分离器型式分类

- (1) 旋风分离型循环流化床锅炉，又可分为冷却型和绝热型两种；
- (2) 惯性分离型循环流化床锅炉；
- (3) 炉内卧式分离型循环流化床锅炉；
- (4) 炉内旋涡分离型；
- (5) 组合分离型循环流化床锅炉。

2. 按分离器的工作温度分类

炉膛出口温度决定了分离器的工作温度，改变炉膛上部受热面的数量可以使炉膛出口温度处于不同范围。

- (1) 高温分离器循环流化床锅炉（应用最广）；
- (2) 中温分离器循环流化床锅炉；
- (3) 低温分离器循环流化床锅炉（适合于鼓泡床）；
- (4) 组合分离器循环流化床锅炉（两级分离）；

在保证分离器可靠工作的条件下，设计中趋于采用高温分离器。

3. 按有无外置式流化床换热器分类（如图0-5所示）

(1) 有外置式流化床换热器的循环流化床锅炉。该种锅炉将燃烧与传热过程分离，在运行中可以分别对燃烧与传热进行方便调节和控制。如果将过热器或再热器的部分受热面布置在外置式换热器中，汽温的调节也比较灵活，但锅炉的结构比较复杂。

(2) 无外置式流化床换热器的循环流化床锅炉。该型式锅炉的燃烧与传热调节复杂，但锅炉的结构相对比较简单。

4. 按固体颗粒物料循环倍率分类

物料循环倍率是指循环物料量与投煤量之比，即

$$R = \frac{\text{物料循环量}}{\text{投煤量}}$$

根据物料循环倍率的大小，可大致分为：

- (1) 低循环倍率流化床锅炉： $R=1\sim5$ ；

(2) 中循环倍率流化床锅炉： $R=6\sim 20$ ；

(3) 高循环倍率流化床锅炉： $R>20$ ，最大可达 200。

5. 按燃烧室压力分类

(1) 常压循环流化床锅炉；

(2) 增压循环流化床锅炉。与燃气轮机组组成联合循环动力装置。

第三节 循环流化床锅炉的特点

一、循环流化床锅炉的主要优点

1. 炉内蓄热量大，燃烧稳定，燃料适应性好

燃烧室内存有大量高温固体物料（约 95% 为惰性颗粒，5% 为可燃物），不同设计的循环流化床锅炉可燃用高硫分煤、高灰分煤、油页岩、煤矸石、垃圾等。

2. 燃烧效率高

由于流化床产生的良好的气固强烈混合，大大强化了燃烧，且燃烧时间不受限制，燃烧效率可达 95%~99%，高于煤粉炉和鼓泡床锅炉的燃烧效率，而且循环流化床锅炉的燃烧效率不受炉内脱硫过程的影响。

3. 低温燃烧污染轻，有利于环境保护

低温燃烧是由灰的变形温度决定的，燃烧温度一般在 850~950℃ 的范围内。流化床锅炉的低温燃烧特性，使 NO_x （包括 NO 和 NO_2 ）的生成量仅是煤粉炉的 1/4~1/3，一般无需烟气脱除氮氧化物的设备。低温燃烧使 SO_3 的生成量降低，在流化床内加入石灰石等脱硫剂，可脱去燃烧过程中生成的 SO_2 ，流化床内脱硫剂与烟气中的 SO_2 的反应环境（温度、时间、传质等）十分有利于脱硫反应的进行。因此，循环流化床锅炉可在较低的钙硫摩尔比下，得到 90% 以上的脱硫效率。

4. 锅炉设备占地面积小

流化床锅炉无单独的烟气脱硫、脱氮装置，无庞大的制粉设备和制粉系统，给煤管道简单，占地面积小。但物料分离器需要占据较大的空间。

5. 负荷调节范围大，调节性能好

(1) 锅炉水循环安全。循环流化床内不存在火焰中心，温度和热负荷分布较煤粉炉均匀得多，在变负荷时不易产生循环停滞和循环倒流，不易产生传热恶化。

(2) 汽温可控性好，能满足负荷大范围变化时对汽温的要求。因为可通过改变循环物料的温度和数量来控制加热、蒸发和过热三个吸热量，进而改变蒸汽温度。

(3) 燃烧稳定。由于炉内物料中大量的是高温颗粒而燃料存量很少，因此可在很低负荷下稳定燃烧而不会产生灭火。当要求负荷变化时，在维持床温不变的条件下，采用改变燃煤量、风量、物料循环量和床层厚度等手段，来实现负荷的调节。但控制系统和操作都比较复杂。

6. 燃烧热强度大

循环流化床锅炉的截面热强度为 3~6MW/m²，是鼓泡床的 2~4 倍、链条炉的 2~6 倍；容积热强度为 1.5~2MW/m³，是煤粉炉的 8~11 倍。因此，循环流化床锅炉的炉膛体积较小，金属消耗少。

7. 炉内传热能力强

循环流化床锅炉炉内传热是上升的烟气和流动的物料与受热面的对流传热和辐射传热，气-固两相混合物的传热系数比煤粉炉的辐射传热系数大得多。

8. 灰渣综合利用性能好

流化床锅炉灰渣未经过高温熔融过程，灰渣活性好，可燃物含量低且石膏为无水石膏，有利于作水泥掺和料或其他建筑材料。

二、循环流化床锅炉存在的问题

- (1) 飞灰含碳量仍较高，使固体未完全燃烧热损失比较大，严重影响锅炉的热效率；
- (2) 对物料分离设备的效率、耐磨性、耐高温性要求高；
- (3) 通风阻力大，需采用高压鼓风机，造成厂用电率高（一般大于10%）；
- (4) 受热面磨损严重，使其安全运行、使用寿命都低于煤粉炉；
- (5) 燃烧控制系统复杂，给实现自动化带来很大困难；
- (6) 大型化也还比较困难；
- (7) N_2O 生成量高于煤粉炉，因为 N_2O 高温时被破坏；
- (8) 理论和技术问题有待进一步解决。

循环流化床锅炉炉内过程

第一节 循环流化床锅炉的基本概念

循环流化床锅炉是在鼓泡流化床锅炉的基础上发展起来的，鼓泡流化床的一些理论和概念可以用于循环流化床锅炉，但是又有很大的差别。早期的循环流化床锅炉流化速度比较高，因此称为快速循环流化床锅炉。快速床的基本理论也可用于循环流化床锅炉。

鼓泡床和快速床都是比较成熟的流化床，其基本原理的研究时间较长，已形成了一定的理论，但是真正的快速循环流化床锅炉并不多见。有些流化床锅炉床内布置有埋管，有些流化床锅炉布置有外置或内置热交换器。对于流化床锅炉的内置、外置热交换器及选择性排渣冷却器、非机械式回料阀等，都可以看成一个小型鼓泡床。

因此，要了解循环流化床锅炉原理，不仅要了解鼓泡床锅炉的原理，还要掌握快速床的基本理论以及物料在鼓泡床→湍流床→快速床各种状态下的动力特性、燃烧特性及传热特性。本节将简单介绍一下循环流化床锅炉涉及到的部分概念和定义。

1. 床料

锅炉启动前，布风板上铺有一定厚度、一定粒度的“原料”，称作床料。床料的成分、颗粒粒径和筛分特性因炉而定。床料一般由燃煤、灰渣、石灰石粉等组成，有的锅炉床料还掺入砂子、铁矿石等成分。有些锅炉冷态、热态调试或启动时仅用一定粒度的砂子做床料。

2. 物料

所谓的物料，主要是指循环流化床锅炉运行中在炉膛内燃烧或载热的物质。它不仅包含床料成分，还包括锅炉运行中给入的燃料、脱硫剂、返送回来的飞灰及燃料燃烧后产生的其他固体物质。分离器捕捉分离下来通过回料阀返送回炉膛的物料叫循环物料，而未被捕捉分离下来的细小颗粒一般称做飞灰，炉床下部排出的较大颗粒叫炉渣（也称做大渣）。飞灰和炉渣都是炉内物料的废料。

3. 密度与空隙率

如果把固体颗粒燃料或物料自然堆放，颗粒间空隙充满气体，若把空隙的体积也看作颗粒体积的一部分，那么这时单位体积的燃料质量（一般不计气体质量）就称为堆积密度，也称视在密度，一般用 ρ_B 来表示，单位为千克每立方米 (kg/m^3)。如果把燃料紧紧密合在一起，内部没有空隙，那么这时单位体积的燃料质量称作颗粒密度或真实密度，用 ρ_P 来表示，单位为千克每立方米 (kg/m^3)。不论是固体燃料煤，还是物料或其他颗粒，尽管粒径大小不同，但粒子间都有空隙。因此堆积密度总是比颗粒密度小。燃料、床料或物料堆积时，其粒子间的空隙所占的体积份额用空隙率 ϵ 来表示。颗粒所占的体积份额就为 $1-\epsilon$ 。

若在体积为 V 的物料中，气体与颗粒所占的体积分别为 V_a 、 V_b ，则堆积密度和颗粒密度与空隙率三者之间的关系如下：

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_a + V_b} = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_P} \quad (1-1)$$

$$1 - \epsilon = \frac{\rho_B}{\rho_P} \quad (1-2)$$

对于燃料或其他固体颗粒，其颗粒密度是不变的，而堆积密度是随空隙率的变化而变化，两者成反比。同一种燃料，因粒径和筛分不同，其堆积密度可能不同，而不同种燃料，堆积密度有时可能相同。

4. 颗粒平均直径、当量直径及球形度

循环流化床锅炉燃用的固体燃料细度要比煤粉炉的粗得多，对不同燃料有不同的要求，粒径一般在 0~8mm 或 0~13mm 之间，因此燃料颗粒直径大小是不等的，尤其是宽筛分燃料，粒径大小的差别就更大。全部颗粒的平均粒径通常用质量平均直径或比表面积平均直径表示。

质量平均直径用 \bar{d}_{pv} 表示，是各档粒径 d_i （所处的相邻筛分孔径的 d'_i 和 d'_{i+1} 的平均直径）与质量份额 x_i 乖积的总和：

$$\bar{d}_{pv} = \sum_{i=1}^{n+1} x_i d_i \quad (1-3)$$

比表面积平均直径用 \bar{d}_{sv} 表示，定义为

$$\bar{d}_{sv} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n+1} x_i / d_i} \quad (1-4)$$

$$d_i = (d'_i + d'_{i+1}) / 2 \text{ 或 } d_i = \sqrt{d'_i d'_{i+1}}$$

式中 \bar{d}_{pv} ——颗粒质量平均直径；

d_i ——某一残留质量所在的筛孔直径与上一筛孔直径的算术平均值；

x_i ——“ i ”组分颗粒占总颗粒的质量份额，即某一筛上的残留百分数，%。

n ——标准筛层数。

燃料的颗粒形状并不规则，为了研究和计算方便，常折算成与颗粒具有相同表面积的球形颗粒的直径——当量直径 $d_{s, sph}$ 。当量直径与平均颗粒直径之间有如下关系：

$$d_{s, sph} = \phi_p \bar{d}_p \quad (1-5)$$

其中 ϕ_p 为颗粒的球形度，它表征了非球形颗粒和球形颗粒的差别，它的定义为

$$\phi_p = \left(\frac{\text{球形颗粒表面积}}{\text{实际颗粒表面积}} \right)_{\text{相同体积}} \quad (1-6)$$

不同的固体颗粒，其 ϕ_p 不同，形状系数一般由试验换算得到。对于球形颗粒， $\phi_p = 1$ ；对于所有其他颗粒， $0 < \phi_p < 1$ 。通常煤颗粒的 ϕ_p 在 0.63~0.73 之间，砂粒在 0.66~0.86 之间。颗粒平均直径、当量直径的概念对于循环流化床锅炉设计、改造、调试都比较重要。

质量平均直径和比表面积平均直径定义中须知颗粒群中全部颗粒的粒度分布，常用的粒度分级方法是筛分法。

5. 燃料筛分

进入锅炉的燃料颗粒直径一般是不相等的。如果粒径粗细的范围较大，即筛分较宽，就称作宽筛分；粒径粗细范围较小，就称作窄筛分。

如某一台 75t/h 循环流化床锅炉，其燃煤颗粒要求 0~8mm，煤粒粒径由 0.1mm 至 8mm，允许范围较宽，所以该炉的燃料筛分可以称作宽筛分；而另外一台锅炉，燃料粒径要求 2~5mm，小于 2mm 和大于 5mm 的颗粒不允许，因此称作窄筛分。宽筛分和窄筛分是相对而言的，但燃料的筛分对锅炉运行的影响很大。一般来说，一旦锅炉确定，其燃料筛分

基本也就确定了,而当煤种变化时其筛分也有所变化。通常,对于挥发分较高的煤,粒径允许范围较大,筛分较宽;对于挥发分较低的无烟煤、煤矸石,一般要求粒径较小,相对筛分较窄。国内目前运行的循环流化床锅炉,其燃料粒径要求一般在 $0.1\sim 8\text{mm}$ 、 $0.1\sim 13\text{mm}$,特殊的要求 $0.1\sim 20\text{mm}$,这些燃料粒径要求范围较大,均属宽筛分。

6. 燃料粒度

燃煤循环流化床锅炉,不仅对入炉煤的筛分有一定的要求,而且对各粒径的煤颗粒占总量的百分比也有一定要求,如某台 220t/h 循环流化床锅炉燃用劣质烟煤,筛分为 $0\sim 10\text{mm}$,其中直径小于 1mm 的颗粒占 60% 左右, $1.1\sim 8\text{mm}$ 的颗粒占 30% 左右, $8\sim 10\text{mm}$ 占 10% 左右。各粒径的颗粒占总量的份额之比称作粒度。因此,这台 220t/h 锅炉燃料的粒度就为 $60:30:10$ 。当然,还可以把燃煤各粒径占总量的百分比划分得更细一些。实际上,原煤经过破碎机破碎后各粒径大小是连续的,按粒度在坐标图上作出的是一条连续的曲线。

燃煤的粒度也称作燃烧颗粒特性,连续的曲线也称做颗粒特性曲线。燃煤的颗粒特性曲线可以很直观地反映入炉煤的各粒径颗粒占总量的百分比。对锅炉设计和运行来说,燃煤颗粒特性曲线比燃煤筛分、粒度更直观更确切,是选择制煤设备和锅炉运行的重要参数。

7. 流化速度

流化速度是指床料或物料流化时通过床层的流体的速度。对于循环流化床锅炉来说,通过床层的空气经风机产生一定能量,通过布风板和风帽使床料(或物料)流化起来,这部分空气称作一次风。

流化速度的大小是假设炉内没有床料或物料时,空气通过炉膛的速度,因此也称空塔速度。如果没有特殊注明,所谓的流化速度是指热态的速度。锅炉热态时,进入炉内的空气变为烟气速度,用 u 表示:

$$u = \frac{Q}{A} \quad (1-7)$$

式中 u ——烟气速度, m^2/s ;

Q ——流体流量, m^3/s ;

A ——炉膛截面积, m^2 。

由于炉膛截面积 A 沿炉膛高度可能有所变化,而且锅炉运行中炉内温度也不尽相同, Q 也变化。所以从广义讲,锅炉流化速度不是一个常数。但一般给出的流化速度是床内空气速度。因此假如 Q 、 A 不变, u 就基本确定了。

流化速度是循环流化床锅炉最基本的概念。运行中控制和调整风量,就控制和调整了流化速度,也就控制了炉内物料的流化状态。所以一次风量的控制和调整是非常重要的。

8. 临界流速 u_{mf} 和临界流量 G_{mf}

临界流速就是床层从固定状态转变到流化状态即床料开始流化时的一次风速,这时的一次风量称作临界流量。临界流量和临界流速的关系为

$$G_{\text{mf}} = \rho u_{\text{mf}} A \quad (1-8)$$

式中 G_{mf} ——临界流量, kg/s ;

u_{mf} ——临界流速, m/s ;

A ——通风截面积, m^2 ;

ρ ——流体密度, kg/s 。

由于锅炉冷态和热态两种工况下炉内温度差别很大，单位质量的空气（一次风）进入炉膛后，容积变化也很大。热态时烟气密度要比冷态时空气密度小得多。因此，热态时的临界流量比冷态时临界流量小得多，而临界流速基本不变。对于鼓泡流化床锅炉，床料为炉渣（含少量烟煤），其粒径在 0~10mm 时，热态临界风量约为冷态的 1/5。

临界流速和临界流量是循环流化床锅炉运行中一个重要的参数。对于不同型号的锅炉或相同型号锅炉而不同物理性质的床料，其临界流量是有差别的。其值可以通过锅炉冷态和热态试验测定，没有条件测试时，可借助经验数据查表获得。

影响临界流速和临界流量的因素很多，床料是其中主要因素之一。床料变化对临界流速和临界流量主要有如下影响。

- (1) 如果床料的当量直径增大时，临界流量就随之增加。
- (2) 床料中颗粒密度增大时，临界流量增大。
- (3) 若床料的空隙率增大，临界流量增大。
- (4) 床料的运动黏度或温度增高时，临界流量将减小。
- (5) 料层膨胀高度对临界流速基本上没有多大影响。

以上讲述的临界流速、临界流量是床料开始流化时的一次风风速和风量，即由固定床转化为鼓泡床的临界风速和风量。对于循环流化床锅炉正常运行时，炉内呈湍流床和快速床流化状态。在鼓泡床转化为湍流床，由湍流床进入快速床，以及最终达到喷流床（气力输送），均有相对应的流化速度和风量。尽管这种风速和风量在锅炉运行操作中也为重要，但不称为临界流速和临界流量。

9. 物料循环倍率

物料循环倍率，是循环流化床锅炉独有的概念。

对于鼓泡流化床锅炉，未布置物料分离器和返料系统。这是因为鼓泡床锅炉流化速度较低，炉膛出口烟气含尘浓度也较小，且尘粒较细，不必分离和不易分离的缘故。而循环流化床锅炉一般流化速度 $u > 4\text{m/s}$ ，甚至达到 $u > 8\text{m/s}$ ，这时大量的物料被烟气带出炉膛，其中含有未被燃尽的煤粒和焦炭颗粒，若不收集返送回炉膛再燃烧，将降低锅炉燃烧效率，炉内的物料也很快被烟气带走。因此物料分离收集和返送回炉膛的数量多少就显得十分重要。

目前，物料循环倍率因炉型、系统以及研究方法的不同，有不同的定义。其中最简单、最通用的概念，是由物料分离器捕捉下来且返送回炉内的物料量与给进的燃料量之比，即

$$R = \frac{W}{B} \quad (1-9)$$

式中 R ——物料循环倍率；

W ——返回炉内的物料量，t/h；

B ——燃料量，t/h。

这种定义和计算的循环倍率对于那些未布置有飞灰和炉渣返送系统以及未单独设立石灰石和添加床料仓的循环流化床锅炉是非常简单和适用的。

物料循环倍率直接影响锅炉的燃烧和传热。由定义可知，一旦燃料量 B 确定后， R 值的大小主要决定于物料回送量。在电厂锅炉运行中入炉煤量一般比较容易控制，而物料回送量 W 的影响因素较多。

- (1) 一次风量。一次风量大小，直接影响物料回送量。一次风量过小，炉内物料的流化

状态将发生变化, 燃烧室上部物料浓度降低, 进入分离器的物料量也相对减少。这样不仅影响分离器的分离效率, 也必然降低分离器捕捉量, 回送量也自然减少。

(2) 燃料颗粒特性。运行中煤的颗粒特性发生变化也将影响回料量的多少。如果入炉煤的颗粒较粗, 且所占份额较大(与设计值比), 在一次风量不变的情况下, 炉膛上部的物料浓度也降低, 其结果与一次风量过小相同。

(3) 分离器效率。即使煤的颗粒特性达到要求, 一次风量也满足设计条件, 而物料分离器效率降低, 也将使回料量减少。分离器效率对物料回送量的影响是很大的, 如某炉每小时进入分离器的物料量为 510t, 若要求返送量为每小时 500t, 那么分离器效率最低也要达到 98%, 如果因某种原因分离器效率下降为 96%, 分离器分离捕捉量仅为 489t/h, 每小时返送回炉膛的物料将减少 10t。

(4) 返料系统。循环流化床锅炉返料系统若不稳定可靠, 即使物料分离器捕捉到一定的物料量, 也将不能稳定及时回送炉内, W 值将发生变化, 影响循环倍率 R 。返料系统对返送量的影响主要取决于返料阀的运行状况, 返料阀内结焦、堵塞或返料风压头过低都将使 W 值减小。因此, 在锅炉运行中不应忽视对返料系统的监视、检查和调整。

第二节 循环流化床锅炉炉内流体动力特性

一、流态化现象

1. 流态化现象

气固流态化是固体颗粒悬浮在气体中表现出类似流体状态的运动模式。

当气体通过一个颗粒床层, 该床层随着气流速度的变化会呈现不同的流动状态。随着气流速度的增加, 固体颗粒分别呈现出固定床、起始流态化、鼓泡流态化、节涌、湍流流态化及气力输送等状态。

在流速较低时, 气流仅是在静止颗粒的缝隙中流过, 这时称为固定床, 如图 1-1 (a) 所示。

当气流速度增大到一定值时, 所有的颗粒被上升的气流托起, 床层开始松动, 气体对颗粒的作用力与颗粒的重力相平衡, 通过床层任意两个截面的压力降与在此两截面间单位面积上颗粒和气体的质量之和相等。这时床层达到起始流态化, 见图 1-1 (b), 此气流速度称为最小流化速度。

当气流速度超过最小流化速度时, 除了非常细而轻的颗粒床会均匀膨胀外, 一般床料内将出现大量气泡, 气泡不断上移, 聚集成较大的气泡穿过料层并破裂, 此时气、固两相强烈混合, 犹如水被加热至沸腾状, 这样的床层称为鼓泡流化床。鼓泡流化床床层有相当明显的床表面, 也称为密相流化床, 如图 1-1 (c) 所示。鼓泡流态化状态下, 整个流化床分两个区域, 一个是下部的密相区又称沸腾段, 它有明显的床层表面; 另一个是上部的床层表面至流化床出口区域, 称为自由空间或悬浮段。

当小颗粒以相当大的超过颗粒的终端速度(将颗粒浮起并静止不动的气流速度)流化时, 床层的上表面就消失, 夹带变得相当明显, 但床内仍存在一个密相区和稀相区。可以观察到不同大小和性质的颗粒团(称乳化合)和气流团(称泡相)的紊乱运动。该床层称为湍流床, 见图 1-1 (e)。