

任永红 主编

循环流化床锅炉

XUNHUAN LIUHUACHUANG GUOLU

实用 培训教材

SHIYONG PEIXUN JIAOCAI



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

循环流化床锅炉 实用培训教材

任永红 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书非常注意理论知识与现场实际相结合,强调语言的通俗易懂性和鲜明性,力求内容的阐述简明扼要、清晰透彻,符合现场培训要求。本书内容包括:循环流化床锅炉概述,燃料、燃烧基础及热平衡,循环流化床锅炉原理,循环流化床锅炉主要燃烧设备及系统,循环流化床锅炉主要汽水设备及系统,循环流化床锅炉运行,循环流化床锅炉故障及处理,典型循环流化床锅炉介绍。

本书可作为电力学校热动专业的教材,也可作为电厂初次上岗的技术工人或具有一定生产经验的技术人员的培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉实用培训教材/任永红主编. —北京:
中国电力出版社, 2007
ISBN 978-7-5083-5056-1

I. 循... II. 任... III. 流化床-循环锅炉-技术
培训-教材 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 165212 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 4 月第一版 2007 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 393 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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

循环流化床锅炉实用培训教材

循环流化床燃烧技术是煤洁净燃烧发电技术的核心。近年来,循环流化床锅炉以其优良的环保性能、优越的调峰经济性、良好的煤种适应性和高效的劣质燃料燃烧等优势,在国内外发电行业中得到迅速推广和发展。目前,220t/h 及以下容量的循环流化床锅炉已在国内外大面积推广,410t/h 级的循环流化床锅炉也已经开始投入商业运行,300MW 循环流化床锅炉示范工程在四川白马电厂已成功运行,超临界循环流化床锅炉示范工程也开始策划。

本书针对目前循环流化床锅炉的特点、基本原理、设备及系统、运行基本知识、故障处理、典型机组介绍等内容进行了深入浅出的阐述,并且将汽水系统的设备及系统也有机的编写进来,这样更有利于技术人员(尤其是没有学习过煤粉炉知识的人员)进行系统学习。书中编入了目前国内广泛使用的 135MW 机组的一些新技术,突出了大型循环流化床锅炉的技术特点。本书共分八章,第一章简要概述循环流化床锅炉的基本组成及特点;第二章介绍燃料燃烧基础及热平衡;第三章讨论了循环流化床锅炉基本原理;第四章详细介绍了循环流化床锅炉燃烧设备及系统;第五章重点介绍了循环流化床锅炉汽水设备及系统;第六章分析了循环流化床锅炉的运行技术,包括冷态试验、启动准备、点火、负荷调整等;第七章介绍了循环流化床锅炉的事故现象、原因及处理措施;第八章介绍了不同容量机组的典型循环流化床锅炉。

在编写过程中,本书非常注意理论知识与现场实际相结合,强调语言的通俗易懂性和鲜明性,力求内容的阐述简明扼要、清晰透彻,符合现场培训需求。本书可作为电力学校热动专业的教材,也可作为电厂初次上岗的技术工人或具有一定生产经验的技术人员的培训教材或参考书。

本书由大同电力高级技工学校高级讲师任永红主编。各章编者如下:第一、二章由李继莲编写,第三、六章由韩云编写,第四、八章由任永红编写,第七章由岳建平编写,第五章由大同金力发电有限公司高级工程师李斌编写。在编写过程中,得到崔作让、霍宇平的大力支持与帮助,在此表示真诚感谢。

本书由大唐太原第二热电厂高级工程师、山西省电力行业发电类锅炉运行专业专家乔清丽,大同电力高级技工学校热动教研室主任陈坚审阅,他们提出了许多宝贵意见,为本书增色不少,在此表示衷心的感谢。

循环流化床燃烧技术的理论及其应用正在不断发展,限于作者的水平,书中错误和欠妥之处在所难免,真诚欢迎各位同行批评指正。

作者

2006 年 12 月

目 录

Contents

循环流化床锅炉实用培训教材

前言

第一章 循环流化床锅炉概况	1
第一节 循环流化床锅炉的发展概况	1
第二节 循环流化床锅炉的构成及工作过程	5
第三节 循环流化床锅炉的主要优缺点	8
第四节 循环流化床锅炉的分类	12
本章小结	13
复习思考题	13
第二章 燃料燃烧基础及热平衡	14
第一节 煤	14
第二节 燃料油	21
第三节 燃烧的基本知识	23
第四节 锅炉机组热平衡	27
本章小结	33
复习思考题	34
第三章 循环流化床锅炉基本原理	36
第一节 基本概念	36
第二节 循环流化床的动力特性	40
第三节 循环流化床锅炉的物料平衡	44
第四节 循环流化床锅炉的传热	45
第五节 循环流化床锅炉的燃烧	48
第六节 循环流化床锅炉的脱硫	54
第七节 循环流化床锅炉中氮氧化物的生成与控制	56
第八节 循环流化床锅炉灰渣的综合利用	58
本章小结	59
复习思考题	59
第四章 循环流化床锅炉主要燃烧设备及系统	61
第一节 燃烧室的结构型式	61
第二节 布风装置	63
第三节 物料分离器	68

第四节	固体物料回送装置	75
第五节	点火装置及系统	82
第六节	炉前碎煤、给煤设备及系统	85
第七节	灰渣冷却与处理装置	92
第八节	风、烟系统	100
第九节	石灰石系统	104
本章小结		106
复习思考题		108

第五章	循环流化床锅炉主要汽水设备及系统	109
第一节	自然水循环原理及蒸发受热面	109
第二节	蒸汽净化	119
第三节	过热器和再热器	126
第四节	省煤器	141
第五节	空气预热器	147
第六节	尾部受热面积灰、磨损和低温腐蚀	150
本章小结		155
复习思考题		157

第六章	循环流化床锅炉运行	158
第一节	循环流化床锅炉运行概述	158
第二节	循环流化床锅炉启动前的试验	159
第三节	循环流化床锅炉的启动和停炉	168
第四节	循环流化床锅炉的变工况特性	178
第五节	循环流化床锅炉运行的监视与调整	184
第六节	循环流化床锅炉的燃烧调节	194
本章小结		200
复习思考题		201

第七章	循环流化床锅炉故障及处理	203
第一节	循环流化床锅炉运行事故	203
第二节	燃烧事故	204
第三节	炉管爆破事故	207
第四节	耐火材料坍塌事故	210
第五节	返料器事故	211
第六节	冷渣器堵塞事故	212
第七节	石灰石系统故障	215
第八节	辅机故障	216
本章小结		220

复习思考题	221
-------------	-----

循环流化床锅炉 第八章 典型循环流化床锅炉介绍	222
---	-----

第一节 国外循环流化床锅炉的发展	222
------------------------	-----

第二节 国内典型循环流化床锅炉介绍	231
-------------------------	-----

本章小结	250
------------	-----

复习思考题	250
-------------	-----

循环流化床锅炉 参考文献	251
--	-----

第 一 章

循环流化床锅炉概况

第一节 循环流化床锅炉的发展概况

随着全球经济的飞速发展,各国对能源的需求越来越多,对能源的开发和利用也在不断完善。我国是目前世界上经济发展最快的国家之一,同时是世界上最大的产煤国,也是最大的煤消耗国。图 1-1 所示是我国能源消费和国内生产总值(GDP)的增长率曲线,从图中可以看出,能源消费的增长和国内生产总值的增长具有同步关系。高速发展的经济必然意味着对能源需求的大量增加,由于煤的开发和利用产生大量废气(如氮氧化物、酸性气体)和废物(如煤矸石),这不仅对环境造成污染,同时,煤矸石中的可燃成分被白白废弃,造成能源的浪费,不符合我们国家节约型社会的发展要求。

能源利用领域带来的环境问题有酸雨污染、粉尘污染和温室效应气体引起的全球气温变暖等问题。我国很大一部分电站锅炉和工业锅炉存在热效率偏低的问题,并且由于脱硫、脱硝设备价格昂贵,很多锅炉机组没有配备相应的脱硫和脱硝装置,给环境方面带来了很大的负担。随着经济的快速发展,由于能源的过度开发与消费累计的效应,产生了制约经济发展和影响人类生存的环境污染问题。煤炭在开

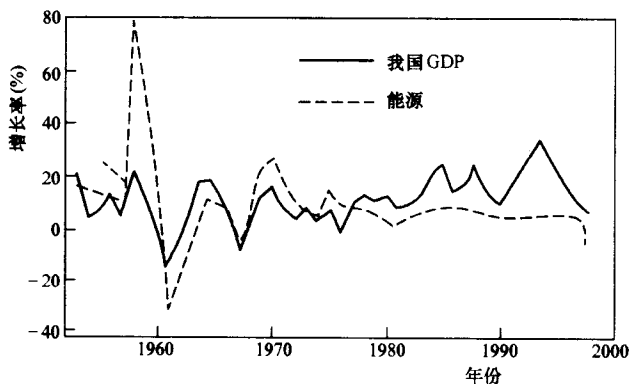


图 1-1 我国能源消费和 GDP 增长率

采、运输和燃烧过程中,如果不采取妥善的处理措施,会产生大量的灰渣、粉尘、废水、酸性气体等污染物,从而带来严重的环境污染问题。经过多年研究和建设,我国的能源工业取得了快速发展,基本形成了规模宏大、门类齐全、技术较为先进的能源生产和消费体系。我国能源结构是以煤为主,年原煤产量超过 10 亿 t。另外,我国煤矸石的堆积量为 10~12 亿 t,并以每年近 1 亿 t 的数量增加,其中 1/3 以上的煤矸石热值在 3350kJ/kg 以上,有利用价值。石煤的储量也十分丰富,仅南方几省就有 618.8 亿 t。褐煤已查明的储量为 845 亿 t。我国入洗原煤量在产量上也由 1995 年的 1.9 亿 t 增至 2.8 亿 t,到 2010 年,我国将使入洗原煤量达到 8.08 亿 t。另外,我国煤储量中有相当一部分是高硫分、高灰分、低热值的劣质煤,由于缺乏有效的污染物排放控制,某些地区的酸雨问题已不容忽视。在导致我国环境恶化的诸多因素中,煤的利用不当首当其冲。

循环流化床锅炉 (CFBB) 是一种可以燃烧劣质燃料的锅炉, 通过流化和循环两个特殊过程, 能把以煤矸石为代表的劣质燃料彻底地烧干净, 提高燃烧效率, 锅炉的燃烧效率达到 90% 以上。

一、国际上循环流化床锅炉的发展状况

目前, 在全世界循环流化床锅炉的开发热潮中, 已经形成了几个技术流派, 并且不同容量等级的锅炉情况也有所不同。

200~300MW 等级循环流化床锅炉主要技术流派有:

(1) 鲁奇 (Lurgi) 技术流派。其代表为法国斯坦因 (Stein) 公司和 ABB-CE 公司, 技术特点为采用绝热旋风分离器带外置换热器的循环流化床技术。

(2) 奥斯隆技术流派。其代表为 FW 公司, 技术特点是采用绝热旋风分离器及炉内布置翼形或屏式受热面。

(3) FW 技术流派。技术特点是采用汽冷旋风分离器及紧凑式外置换热器, 即带整体化循环物料换热器 (INTREX) 的循环流化床锅炉。

100MW 等级的循环流化床锅炉, 除上述技术流派外, 还有以美国 FW 公司为代表的紧凑式方形旋风分离循环流化床技术, 以 EVT 为代表的采用绝热旋风分离器及炉内布置屏式受热面的循环流化床锅炉技术。

50MW 及以下容量的循环流化床锅炉, 除上述技术流派外, 还有以德国巴高克 (Babcock) 公司为代表的采用塔式布置中温旋风分离循环流化床技术, 美国 B & W 公司的采用两级分离的循环流化床技术。

20 世纪 90 年代中期以来, 世界上多台 200MW 以上等级的循环流化床锅炉投入商业运行, 如 1995 年 11 月, 采用德国鲁奇 (Lurgi) 循环流化床燃烧技术, 由法国通用电气阿尔斯通斯坦因工业公司 (GASI) 设计制造的法国普罗旺斯 (Provence) 电站 250MW 循环流化床锅炉投入商业运行。普罗旺斯电站的成功投运成为大型循环流化床锅炉发展史上的一个里程碑, 它不仅解决了循环流化床锅炉大型化过程中的很多技术问题, 更重要的是, 它为大型化工作的进一步开展增强了信心。目前, 美国 ABB-CE 公司、福斯特惠勒 (Foster Wheeler) 公司等主要循环流化床锅炉制造商都完成了 200~250MW 等级产品的开发工作, 相应在韩国东海 (Tonghae) 电厂和波兰图鹿 (Turow) 电厂分别投运了他们的产品, 运行状况均令人满意。

由于国际锅炉制造业竞争剧烈, 互相兼并和收购是司空见惯的事情, 到目前为止, 在 250MW 等级以上容量的循环流化床锅炉开发阵营中, 仅存在两个大的集团公司: 法国通用电气阿尔斯通 (Alstom) 集团公司和美国福斯特惠勒 (FW) 公司。阿尔斯通集团不但拥有斯坦因工业公司, 而且先后收购了德国 EVT 公司和 ABB-CE 公司中的锅炉制造分部, 因此二者的循环流化床锅炉技术及业务均由阿尔斯通集团掌控。美国福斯特惠勒公司收购了芬兰的奥斯隆 (Ahlstrom) 循环流化床锅炉业务, 因此福斯特惠勒不但拥有自己的循环流化床锅炉技术, 而且拥有奥斯隆循环流化床锅炉技术。

循环流化床锅炉的技术发展过程表明, 循环流化床燃烧技术日趋完善与成熟, 各技术流派逐步趋同, 特别是在核心关键参数及流程上形成了主流派技术。纵观国外循环流化床锅炉大型化的经验, 大容量 (200MW 等级) 循环流化床锅炉都毫无例外地采用旋风分离技术, 绝大多数带有外置换热器来增加锅炉运行的灵活性和可靠性。在中小容量循环流化床锅炉范

围,根据不同情况进行适当简化,形成针对性强的专项技术,使得在主流技术体系下,循环流化床锅炉具有某种灵活性,如分离器型式和外置换热器的设置等。

大容量循环流化床锅炉之所以采用旋风分离器,是因为旋风分离器的分离性能能够满足循环流化床锅炉的要求。但是当锅炉容量放大时,分离器也存在放大问题,即尺寸放大后分离效率下降的问题,传统理论预测分离器直径不能超过 $5\sim 6\text{m}$,经过不断放大实践的探索,成功解决了旋风分离器放大的难题。到目前为止,旋风分离器的直径可以放大到 10m ,如 235MW 循环流化床锅炉仅采用两个旋风分离器即可满足要求。如何对分离技术实施放大是循环流化床锅炉研发的一个核心内容,正是旋风分离器放大技术在实践和理论上的突破,使循环流化床锅炉的大型化成为现实。

目前,国外约有60台 100MW 以上循环流化床锅炉,其中已经投产运行的为40余台。它们大多数主要在欧美,约有20%在亚洲。单台连续运行最高记录为13个月,可用率达到98%。循环流化床检验规程和安全规程已经列入美国ASME标准,这是其技术成熟及标准化的重要标志。

循环流化床锅炉技术的国际发展趋势是继续开发 300MW 等级以上的大型电站循环流化床锅炉。国外循环流化床锅炉制造公司认为,目前制造 600MW 循环流化床锅炉在技术上是把握的,研究开发的一个重要方向是超临界参数循环流化床锅炉。由于超临界技术及大型化循环流化床技术均已掌握,因此将二者结合成的超临界循环流化床锅炉会在效率和环保上实现双突破,完全有可能形成一种在整体煤气化燃气蒸汽联合循环(IGCC)、增压流化床燃烧(PFBC)、常规燃煤电厂(PC+FGT)之外的清洁煤技术,当前一些著名的循环流化床锅炉公司都非常关注这一点。

二、我国循环流化床锅炉发展状况

我国于20世纪80年代开始了循环流化床锅炉燃烧技术的研究开发,虽然起步较晚,但进步很快。目前, 200MW 及以下容量的循环流化床锅炉已在国内大面积工业推广。引进技术促进了我国循环流化床燃烧技术的发展。据不完全统计,我国已经有30余台 135MW 等级循环流化床锅炉在运行,百余台订货, 300MW 循环流化床锅炉在四川白马电厂已成功运行,有20台订货,2006年开始陆续投入商业运行。超临界循环流化床锅炉示范工程也开始策划。

循环流化床锅炉燃烧技术在我国还是一门年轻的技术,无论是锅炉本体,还是辅助系统都需要进一步完善。令人欣慰的是,通过锅炉厂家和有关科研单位的努力,对锅炉本体的研究取得了初步的成果,下一步应集中精力对锅炉的辅助系统进行攻关。在流化床锅炉燃烧机理、设计准则、调试运行和检修维护等方面,已经积累了大量的经验。但作为一种新的燃烧方式,有关循环流化床的基本理论还不能很好地满足工程实践的需要,有关的设计方法和思想还不是十分明确,与循环流化床锅炉有关的运行和检修还没有统一的标准。同时,尽管循环流化床锅炉的运行易于掌握,但必须尽快掌握它的运行特点和与其他炉型不一致的控制参数。只有从锅炉的设计、制造、运行各个方面严格控制,才能使这门技术充分发挥它的优势,从而得到尽快的发展。

我国发展循环流化床锅炉已有近20年的历史,其发展的主要目的是利用劣质燃料。发展过程大致可分成三个阶段:

(1) 改造旧锅炉,掌握流化床锅炉燃烧技术。从20世纪60年代中期到70年代中期,主要是改造旧锅炉,利用当地劣质燃料。典型代表是广东江门甘蔗化工厂的 50t/h 和四川永

荣矿务局的 19t/h 的流化床锅炉。通过这些改造旧锅炉的试验，基本上掌握了流化床锅炉燃烧技术，为研制新锅炉打下了基础。

(2) 研制新锅炉，应用流化床燃烧技术。上海发电设备成套设计研究所和上海锅炉厂在一系列试验台试验和工业性试验的基础上，共同研制了电站用 35t/h 和 130t/h 的流化床锅炉，分别安装在益阳石煤发电综合利用试验厂和鸡西矿务局滴道电厂。东方锅炉厂也在试验研究的基础上制造了 35t/h 流化床锅炉，安装在四川永荣矿务局电厂。这几台锅炉的运行实践证明：流化床锅炉是我国利用劣质燃料的一条途径。

(3) 发展循环流化床锅炉，提高流化床燃烧技术。为了提高燃烧效率，各科研单位、高等学校和制造厂家合作，研制了各种型式的循环流化床锅炉和带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉。清华大学与中国科学院工程热物理所研制的 35、75t/h 小循环流化床锅炉相继运行，哈尔滨工业大学、上海发电设备成套设计研究所研制的 130t/h 带飞灰循环燃烧的新型鼓泡床锅炉已投入运行，浙江大学研制的 35t/h 煤泥流化床锅炉也已投入运行，华中理工大学研制的 35t/h 循环流化床锅炉具有典型的 Π 型布置和中温除尘的特点，也已投入运行。清华大学与中国科学院工程热物理所研制的 220t/h 循环流化床锅炉也已相继投入运行。这阶段发展的特点是，循环流化床锅炉与带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉同时并举，并从利用劣质煤为中心转向高效、低污染的煤燃烧技术的综合发展。

应用流化床燃烧技术燃烧劣质燃料，无疑有重要的战略意义。可以预料，未来的 5~10 年间是我国流化床燃烧锅炉向大型化发展的年代。我国的发展战略是：因地制宜地发展带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉和各种型式的循环流化床锅炉。在旧锅炉和超龄锅炉的改造中使用流化床燃烧技术，以达到既能提高燃烧效率、减少污染，又能利用低质燃料的目的。

我国目前状况：

(1) 清洁煤燃烧发电是国内外新崛起的发电技术，循环流化床是应用清洁煤燃烧技术的成果，它是利用脱硫剂（石灰石）使煤在流化床上燃烧时脱硫，如控制好炉内的钙硫比，其脱硫率可达到 90% 以上，环保效益好，是国家在调整电力结构时要求积极发展的发电技术之一。

(2) 循环流化床锅炉比常规燃煤锅炉贵，但与带脱硫装置的常规燃煤电厂（PC+FGT）相比，同容量的循环流化床锅炉电厂的建设费用是常规燃煤电厂的 90%，运行维护费用也只是常规燃煤电厂的 90%。

(3) 我国很多地区由于电厂的生产，使该地区酸雨和二氧化硫污染严重，特别是珠江三角洲地区的环境污染已经到了非治理不可的地步，因此必须对现有电厂加装脱硫装置。但是对现有电厂加装脱硫装置存在着资金、技术、政策等问题，难以调动企业的积极性。如果在项目建设之初就使用循环流化床锅炉，就可避免这种情况的发生。

(4) 目前，我国部分地区的电厂还没有应用循环流化床这种清洁煤燃烧发电技术，这是因为现有政策使脱硫成本无法进入电价，而脱硫设施只有环境效益，不产生经济效益，不具有还贷能力，因此虽然循环流化床锅炉技术已趋于成熟，环保性能特别好，但投资者还是没有积极性。

(5) 为了鼓励投资者积极利用清洁煤燃烧发电技术，改善我国生态环境状况，建议政府尽快制定鼓励政策。根据当地实际情况批准建设循环流化床电站，以逐步推广清洁煤燃烧发电技术。

“十一五”期间，国内自主开发的 135MW 等级的循环流化床锅炉要取得依托工程，投入商业运行，并研制出具有国家自主知识产权的 200MW 循环流化床锅炉，为 300、600MW 及超临界参数的循环流化床锅炉的开发提供技术和实践平台。

综观国内循环流化床锅炉研究开发的整个过程，前期工作主要停留在分离技术（旋风分离器的替代技术）、物料循环系统与关键部件的技术探索，配套系统的形成等方面。经过长时间的技术积累和市场培育，现在用户主要关心的是锅炉的可靠性和综合经济环保特性，要求锅炉具有高可靠性、高经济性和高环保性。因此循环流化床锅炉大型化研究开发工作必须以高可靠性、高经济性和高环保性为核心。

随着时间的推进和技术的进步，循环流化床燃烧技术研究的成果日臻完善，迫切需要研制融合最新技术成果、具有高性能的更大容量的循环流化床锅炉。国际上采用高温旋风分离技术是循环流化床锅炉发展的主流派技术，采用具有冷却表面的旋风分离器是一个新的发展趋势，但是成本较高。目前，也有采用方形（异型）分离器的循环流化床锅炉，对于大容量多变煤种的情况，其能否满足高效、低污染等技术指标还在探索之中。旋风分离技术是一个经过探索、行得通的分离技术，目前运行的发电 200MW 以上容量的循环流化床锅炉均采用旋风分离器。因此循环流化床锅炉大型化应首选旋风分离器技术，这也是国际上的主流技术，以确保高的分离性能，减少大型化的技术风险。

从国内外的技术对比来看，国内目前的循环流化床锅炉技术并不落后，可以说是紧跟国际的发展前沿。但在锅炉容量、整体技术、配套技术等方面尚有一些差距，研究与开发的投入还远远不够，特别是研究资金投入不足，研制开发力量分散等多种因素，导致研究开发工作进展缓慢。经过长时间的技术普及和市场培育，目前在国家有关政策支持下，特别是国家计委和经贸委均在组织具有自主技术的大型循环流化床的示范工程，用户已经能够接受具有自主技术的大容量循环流化床锅炉产品，因此迫切需要加紧开发和应用大容量循环流化床锅炉技术。

■ 第二节 循环流化床锅炉的构成及工作过程

一、循环流化床锅炉的基本构成

循环流化床锅炉可分为两个部分。第一部分由炉膛（流化床燃烧室）、气固分离设备（分离器）、固体物料再循环设备（返料装置、返料器）和外置换热器（有些循环流化床锅炉没有该设备）等组成，上述部件形成了一个固体物料循环回路。第二部分为尾部对流烟道，布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等，与常规火炬燃烧锅炉相近。

图 1-2 所示为典型的循环流化床锅炉示意图。燃料和脱硫剂由炉膛下部进入锅炉，燃烧所需的一次风和二次风分别从炉膛的底部和侧墙送入，燃料的燃烧主要在炉膛中完成。炉膛四周布置有水冷壁，用于吸收燃烧所产生的部分热量。由气流带出炉膛的固体物料在分离器内被分离和收集，通过返料装置送回炉膛，烟气则进入尾部烟道。

1. 炉膛

炉膛的燃烧以二次风入口为界分为两个区。二次风入口以下为大粒子还原气氛燃烧区，二次风入口以上为小粒子氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程、 NO_x 和 N_2O 的生成及分解过程主要在燃烧室内完成。燃烧室内布置有受热面，它完成大约 50% 燃料释放热量的传递过程。流化床燃烧室既是一个燃烧设备，也是一个热交换器或脱硫、脱氮装置，集

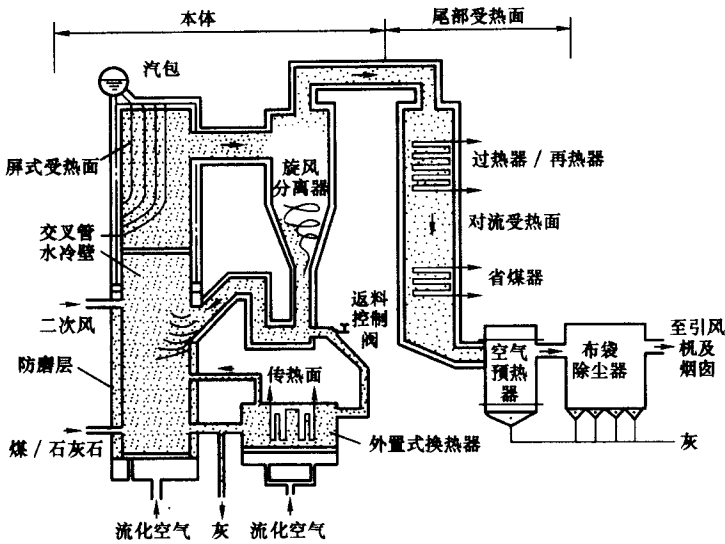


图 1-2 循环流化床锅炉示意图

并连续地把收集下来的物料回送至炉膛，实现灰平衡及热平衡，才能保证炉内燃烧的稳定性与高效。

循环流化床锅炉的气固分离器必须满足下列几个要求：①能够在高温情况下正常工作；②能够满足极高浓度载粒气流的分离；③具有低阻特性；④具有较高的分离效率；⑤与锅炉整体相适应，使锅炉结构紧凑。

目前循环流化床锅炉使用的分离器主要分为两大类：旋风分离器和惯性分离器。一般来说，旋风分离器效率较高，体积大，而惯性类分离器效率稍逊，但尺寸小，使锅炉结构较为紧凑。按使用条件不同，分离器又可分为三大类：高温分离器（800℃左右）、中温分离器（400~600℃）和低温分离器（200~300℃）。从对锅炉性能的影响上看，高温分离较为优越，原因是被烟气夹带的颗粒可以不间断燃烧，提高煤的燃尽程度，另外 CFBB 炉膛内的固体物料浓度较高，造成炉内的气相混合较差，CO 浓度较高，高温分离器内的二次燃烧可降低 CO 浓度，二次燃烧造成的升温还有利于 N_2O 的还原，降低 N_2O 排放浓度。按布置方式分内循环分离器、炉外循环分离器和夹道循环分离器。

就系统结构而言，分离器设计、布置得是否合理直接关系到锅炉系统制造、安装、运行、维修等各方面的经济性与可靠性。虽然分离器是循环流化床锅炉必不可少的关键环节，但它又具有相对的独立性和灵活性，在结构与布置上回旋余地很大。从某种意义上讲，没有分离器也就没有循环流化床锅炉，循环流化床锅炉燃烧技术的发展也取决于气固分离技术的发展，分离器设计上的差异标志着不同的循环流化床技术流派。它的型式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的型式和紧凑性，它的性能对燃烧室的空气动力特性、传热特性、物料循环、燃烧效率、锅炉出力及蒸汽参数、对石灰石的脱硫效率和利用率、对负荷的调节范围和锅炉启动所需时间以及散热损失和维修费用等均有重要影响。

国内外普遍采用的分离器有高温耐火材料内砌的绝热旋风分离器、水冷或汽冷旋风分离器、各种型式的惯性分离器和方形分离器等。

流化过程、燃烧、传热与脱硫反应、脱硝反应于一体。所以流化床燃烧室是流化床锅炉燃烧系统的主体。

2. 分离器

循环流化床锅炉的分离器是循环流化床锅炉燃烧系统的关键部件之一。其主要作用是将大量高温固体物料从气流中分离出来，送回燃烧室，保证燃料和脱硫剂多次循环、反复燃烧和反应。从运行机理上来讲，只有当分离器完成了含尘气流的气固分

3. 返料装置

返料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。

返料装置的作用是将分离器收集下来的物料送回流化床循环燃烧，并保证流化床内的高温烟气不经过返料装置短路流入分离器。返料装置既是一个物料回送器，也是一个锁气器。如果这两个作用失常，物料的循环燃烧过程建立不起来，锅炉的燃烧效率将大为降低，燃烧室内的燃烧工况变差，锅炉将达不到设计蒸发量。

流化床锅炉燃烧系统中常用的返料装置是非机械式的。设计中采用的返料器主要有两种类型：一种是自动调整型返料器，如流化密封返料器；另一种是阀型返料器，如 L 阀等。自动调整型返料器能随锅炉负荷的变化自动改变返料量，不需通过调整返料风量。阀型返料器要改变返料量则必须通过调整返料风量，也就是说，随锅炉负荷的变化必须调整返料风量。

4. 外置换热器

部分循环流化床锅炉采用外置换热器。外置换热器的作用是使分离下来的物料部分或全部（取决于锅炉的运行工况和蒸汽参数）通过它，并将其冷却到 500°C 左右，然后通过返料器送至床内再燃烧。外置换热器不是循环流化床锅炉的必备部分，其本身的功能是一个受热面或者兼有回送功能的受热面。一般在外置式换热器内按温度的不同布置不同型式的受热面，各受热面之间可以用隔墙隔开，可布置省煤器、蒸发器、过热器、再热器等受热面。

外置换热器的实质是一个细粒子鼓泡流化床热交换器，流化速度为 $0.3\sim 0.45\text{m/s}$ ，它具有传热系数高、磨损小的优点。采用外置换热器的优点如下：①可解决大型循环流化床锅炉床内受热面布置不下的困难；②为过热蒸汽温度和再热蒸汽温度的调节提供了很好的手段；③增加循环流化床锅炉的负荷调节范围；④增加同一台锅炉对燃料的适应性；⑤节约锅炉受热面的金属消耗量。其缺点是它的采用使燃烧系统、设备及锅炉整体布置方式比较复杂。

外置换热器的受热面设计中必须十分注意的两个问题是管束的夹持和防磨。

德国鲁奇型和美国巴特尔型、FW 型和 Alstom-CE 型循环流化床燃烧系统均采用了外置换热器。我国自主开发的 220t/h 以下的循环流化床锅炉均没有采用，大型循环流化床锅炉拟采用。

二、循环流化床锅炉的工作过程

流化床燃烧是床料在流化状态下进行的一种燃烧，其燃料可以为化石燃料、工农业废弃物和各种劣质燃料。一般粗重的粒子在燃烧室下部燃烧，细粒子在燃烧室上部燃烧。被吹出燃烧室的细粒子采用各种分离器收集下来之后，送回床内循环燃烧。图 1-3 给出了循环流化床锅炉的工作过程。

在燃煤循环流化床锅炉的燃烧系统中，燃料煤首先被加工成一定粒度范围的宽筛分煤，然后由给料机经给煤口送入流化床密相区进行燃烧，其中许多细颗粒物料将进入稀相区继续燃烧，并有部分随烟气飞出炉膛。飞出炉膛的大部分细颗粒由固体物料分离器分离后，经返料器送回炉膛，再参与燃烧。燃烧过程中产生的大量高温烟气流经过热器、再热器、省煤器、空气预热器等受热面进入除尘器进行除尘，最后由引风机排至烟囱进入大气。循环流化床锅炉燃烧在整个炉膛内进行，而且炉膛内具有很高的颗粒浓度，高浓度颗粒通过床层、炉

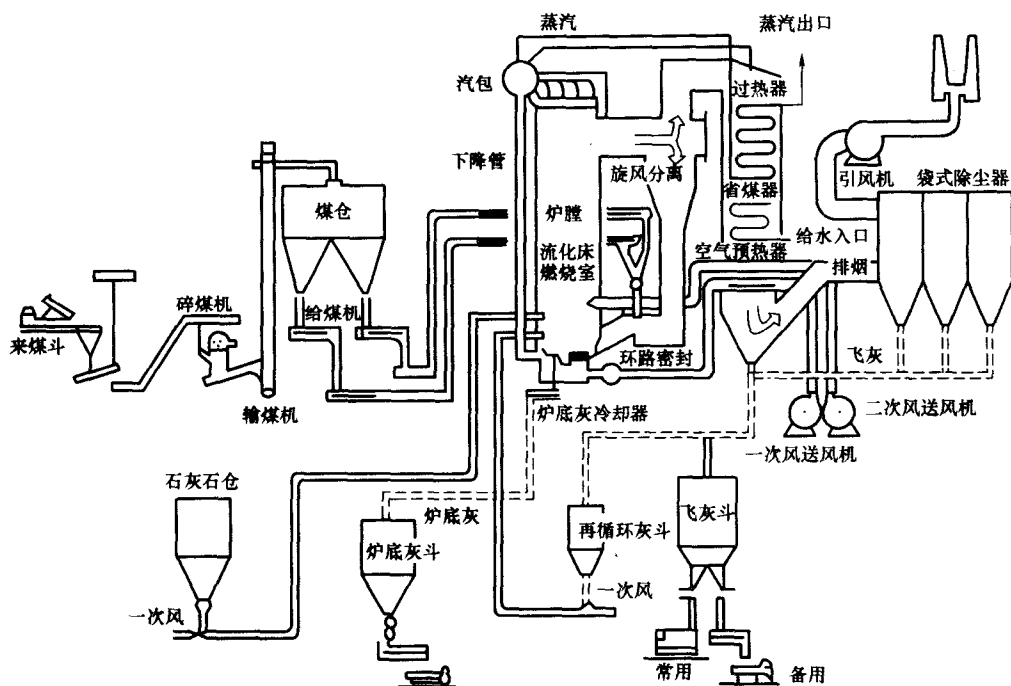


图 1-3 循环流化床锅炉的工作过程

膛、分离器和返料装置，再返回炉膛，进行多次循环，颗粒在循环过程中进行燃烧和传热。

锅炉给水首先进入省煤器，然后进入汽包，经下降管进入水冷壁。燃料燃烧所产生的热量在炉膛内通过辐射和对流等传热形式由水冷壁吸收，用以加热给水生成汽水混合物。生成的汽水混合物进入汽包，在汽包内进行汽水分离。分离出的水进入下降管继续参与水循环，分离出的饱和蒸汽则进入过热器系统继续加热变为过热蒸汽。

锅炉生成的过热蒸汽引入汽轮机做功，将热能转化为汽轮机的机械能。一般 125MW 及以上机组锅炉将布置有再热器，这些机组中的汽轮机高压缸排汽将进入锅炉再热器进行加热，再热后的蒸汽进入汽轮机中、低压缸继续做功。

■ 第三节 循环流化床锅炉的主要优缺点

流态化技术在煤燃烧领域的应用产生了鼓泡床锅炉与循环流化床锅炉。鼓泡床锅炉燃烧效率不高。循环流化床锅炉采用飞灰循环燃烧，克服了燃烧效率不高的缺点。人们普遍认为：流化床燃烧将是工业锅炉、电站锅炉和工业窑炉的一种很有前途和竞争力的燃烧方式。循环流化床锅炉与常规锅炉相比有如下优缺点。

一、循环流化床锅炉的优点

(1) 对燃料的适应性特别好。飞灰再循环量的大小可以改变床内的吸热份额，所以循环床锅炉对燃料的适应性特别好。只要燃料的热值大于把燃料本身和燃烧所需空气加热到稳定燃烧温度所需的热量，这种燃料就能在循环流化床内稳定燃烧，不需要使用辅助燃料助燃就能达到高的燃烧效率（此时床内不布置受热面）。循环流化床锅炉既能燃烧优质燃料，又能

烧劣质燃料,这对一些燃料来源、种类和质量多变的锅炉用户来说是十分适宜的。

(2) 燃烧效率高。常规工业锅炉和流化床锅炉燃烧效率为 85%~90%。循环流化床锅炉由于采用飞灰再循环燃烧,当燃烧劣质燃料和优质燃料时,其锅炉燃烧效率可达 95%~99%,能与煤粉燃烧锅炉相媲美。

(3) 炉内传热能力强。由于飞灰再循环燃烧克服了常规流化床锅炉床内燃烧释热份额大、悬浮段释热份额小的缺点,提高了锅炉的炉膛截面热强度和容积热负荷。常规流化床锅炉的炉膛截面热强度为 $1\sim 3\text{MW/m}^2$,而循环流化床的截面热强度为 $3\sim 8\text{MW/m}^2$ 。常规流化床锅炉的炉膛容积热强度为 $0.1\sim 0.2\text{MW/m}^3$,而循环流化床锅炉的炉膛容积热强度为 $0.16\sim 0.32\text{MW/m}^3$ 。

(4) 脱硫效率高。由于飞灰的再循环燃烧过程,床料中未发生脱硫反应的石灰石能再回到床内与 SO_2 反应,提高石灰石的利用率。当钙硫比为 1.5~2.0 时,脱硫效率可达 85%~90%。而常规流化床锅炉,当钙硫比为 3~4 时,脱硫效率才能达到 85%~90%。后者的钙的消耗量增加一倍多。

(5) NO_x 排放量低。由于循环流化床锅炉采用分级燃烧,温度控制在 $830\sim 850^\circ\text{C}$ 范围之内, NO_x 的生成量显著减少,其排放浓度为 1200mg/m^3 ,而常规流化床锅炉燃烧和煤粉炉燃烧,其 NO_x 的排放浓度分别为其 2~3 倍。

(6) 负荷变化范围大,调节特性好。当锅炉负荷变化时,只需调节给煤量和流化速度就可满足负荷的变化。在低负荷时,循环流化床锅炉不需要像常规流化床锅炉那样采取分床压火,也不需要像煤粉炉那样用油助燃。一般情况下,循环流化床锅炉热负荷变化范围为 100%~25%,其变化速率为 5%~10%。这一优点使循环流化床锅炉用于电网的调峰机组、热负荷变化大的热电联产机组和供热工业锅炉是特别适宜的。

(7) 给煤点数量少。循环流化床锅炉内由于粒子浓度较小(与鼓泡床锅炉相比),横向粒子混合特性较好,不需要像鼓泡床锅炉那么多的给煤点。130t/h 蒸发量的鼓泡床锅炉有 6 个给煤点,而循环床锅炉有 1~2 个给煤点就够了,这大大简化了炉前给煤点的布置,为流化床锅炉的大型化创造了有利条件。

(8) 无埋管磨损。鼓泡床锅炉由于浓相床内燃料燃烧释热份额大,必须布置埋管。埋管受热面磨损严重是鼓泡床锅炉的缺点。循环床锅炉由于飞灰再循环和床料平均粒径较小,床内下部与上部燃料燃烧释热较均匀,因而在燃烧室内受热面的布置方面可取消埋管,采用膜式水冷壁和其他附加受热面,从而消除了鼓泡床锅炉埋管受热面的磨损问题。

(9) 易于实现灰渣综合利用。循环流化床锅炉的燃烧过程属于低温燃烧,同时炉内优良的燃尽条件使得锅炉灰渣的含碳量低。低温燃烧的灰渣易于实现综合利用,如灰渣作为水泥掺和料或建筑材料。同时,低温燃烧也有利于灰渣中稀有金属的提取,脱硫后含有硫酸钙的灰渣还可以用来制作膨胀水泥。

二、循环流化床锅炉尚待进一步研究的问题

为使循环流化床锅炉的设计和运行达到优化,充分发挥循环流化床锅炉的优点,尚需要对以下诸方面进行深入的研究。

1. 循环物料的分离

循环流化床锅炉的分离装置按工作温度可分为高温、中温和低温分离,按分离的作用型式又可分为旋风分离、惯性分离等。以目前循环流化床锅炉的运行情况看,高温旋风分离器

还是比较成熟的,但当燃用高灰分燃料时分离器的磨损问题尚未解决,而且分离器的体积也十分庞大,基本上和炉膛直径相近。受旋风分离器最大尺寸的限制,大容量循环流化床锅炉必须配置多个分离器。由于旋风分离器内衬有较厚的防磨耐火材料,热惯性大,因此延长了启动时间,负荷变化动态特性变差。采用惯性分离器是值得探讨的,因为惯性分离器设备比较简单,体积小,结构布置比较方便,流动阻力也相对较小。此外,还应探讨中、低温分离器。总之,循环流化床锅炉的发展要求配备效率高、体积小、阻力低、磨损轻和制造运行方便的循环物料分离装置。

2. 循环流化床内固体颗粒的浓度选取

循环流化床锅炉内固体颗粒浓度对燃烧过程、脱硫过程和传热过程都有很大的影响,但合适的循环流化床锅炉内固体颗粒浓度的确定却十分困难。目前各循环流化床锅炉制造厂家所采用的炉内颗粒浓度相差很大,但都能保证锅炉良好的运行。反映炉内颗粒浓度的一个重要参数是循环倍率,国内的一些循环流化床锅炉的循环倍率通常在10以下,而国外许多锅炉的循环倍率常常达到50甚至更高。在分析循环流化床锅炉的工作过程时,我们不仅要考虑物料的外部循环,还要考虑炉内的内循环,即物料在炉内由于壁面效应或受内构件等的影响而下落所造成的内部循环。在高风速运行时,物料的内循环将更为显著。目前对物料内循环的定量分析还缺乏有效的手段。循环床锅炉内固体颗粒浓度的合理选取受燃烧、脱硫、传热、磨损、能耗等一系列因素的影响,该参数的确定对循环流化床锅炉的基础理论研究有重要的学术意义,对于设计循环流化床锅炉有很大的实用价值。

3. 炉内受热面布置和温度控制

为了保证循环流化床锅炉的炉内温度控制在一定范围内,在固体颗粒循环回路中必须吸收一部分热量。目前炉内吸热主要有以下两种方法:一种是在炉膛内布置水冷壁或隔墙,另一种是在炉膛内布置部分受热面,在固体物料循环回路上再布置流化床换热器。大量的锅炉在采用这两种型式在实际运行中证明都是可行的。但这两种方法的床温控制方式是不同的。前一种方法主要是靠调节返料量来调节床内固体颗粒浓度,以改变水冷壁的换热系数,从而改变炉内的吸热量来控制床温。第二种方法则仅需要调节进入流化床换热器和直接返回炉内的固体物料量的比例便可控制床温,相对比较灵活,特别适合于大容量的循环流化床锅炉。不过,对上述两种方法的优化以及新的床温控制方式,包括自动控制温度等,仍有必要进行更进一步的研究。

4. 运行风速的确定

循环流化床锅炉的运行风速(或截面热负荷)是一个很重要的参数,一般运行风速为4~10m/s。运行风速的提高会使炉子更为紧凑,截面热负荷相应增大,此时为了保证燃料和石灰石颗粒有足够的停留时间和布置足够的受热面,必须增加炉膛高度。这样不仅受热面磨损会增加,而且锅炉的造价可能会增加,风机功率增大,厂用电也会增大。但运行风速选择过低则发挥不了循环流化床锅炉的优点,因此对每种燃料都具有最佳的运行风速。

截面热负荷的选择与运行风速的选择相似,该参数主要影响炉膛的截面积和炉膛的高度。一般循环流化床锅炉的截面热强度为3~6MW/m²。实际上,对于给定的燃料及过量空气系数,在运行风速与截面热强度中只要有一个参数确定,另一个参数也随之确定。

如何根据燃料特性来确定循环流化床锅炉的运行风速也是一个比较重要的问题,在发展循环流化床锅炉的过程中应进行进一步地探索。