



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

循环流化床锅炉 设备及运行

(第三版)

杨建华 主 编

王玉召 屈卫东 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

循环流化床锅炉 设备及运行

(第三版)

主 编	杨建华	屈卫东
副 编	左玉召	王 举
编 者	陈绍敏	王智微
主 审	岳光溪	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书从实际应用的角度,对循环流化床锅炉的基本原理、设备特点及运行检修等内容进行了较为全面的论述。主要内容包括锅炉基础知识、循环流化床气固两相流特性、循环流化床燃烧与炉内传热、循环流化床锅炉本体设备及系统、辅机设备及系统、循环流化床锅炉调试与运行、循环流化床锅炉检修与维护、典型循环流化床锅炉介绍等。不仅介绍了循环流化床锅炉特有的设备和系统,还包括了锅炉通用知识,如燃料与燃烧、锅炉热平衡、锅炉汽水系统等,便于没有煤粉炉基础的人员使用。本书内容通俗易懂,理论与实际相结合,讲解深入浅出,实用性强。

本书可作为高职高专电力技术类电厂热动力装置、火电厂集控运行及相关专业的教材,也可供从事循环流化床锅炉运行和管理的人员参考,还可作为电厂人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉设备及运行/杨建华主编. —3版. —北京:中国电力出版社, 2014. 8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-5960-4

I. ①循… II. ①杨… III. ①循环流化床锅炉—锅炉运行—
高等职业教育—教材 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第116581号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年1月第一版

2014年8月第三版 2014年8月北京第七次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 375千字

定价30.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

本书第一版为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，第二版为普通高等教育“十二五”国家级规划教材（高职高专教育），2010年修订出版，第三版被评为“十二五”职业教育国家规划教材。

进入21世纪以来，能源、环境形势日益严峻，节约能源、保护环境的呼声日益高涨。循环流化床锅炉作为近几十年来发展起来的一种新型洁净煤燃烧技术，在清洁燃烧特别是燃烧劣质煤方面具有无可替代的优势，它具有污染物排放低、燃料适应范围广、调峰能力强、燃烧效率高等特点，具有很好的节能和环保性能。我国的电力供应及工业、民用供热所需燃料绝大部分来自煤炭，但我国地域辽阔，煤种繁多，劣质煤所占比重大。为充分利用劣质燃料，用比较小的代价获取较低的污染排放，循环流化床锅炉技术成为首选。目前，循环流化床锅炉已在我国各容量等级电厂中得到应用，且日益向大型化发展。容量涵盖几兆瓦至600MW等级超临界压力机组。我国在循环流化床锅炉技术方面的商业应用已走在世界前列。

但循环流化床锅炉毕竟是一种相对新兴的技术设备，直至今日该项技术的普及推广工作既不够广泛也不够深入。作为培养工程应用型人才的职业学校和相关高等院校，必须尽快把循环流化床锅炉技术反映到相关专业的教学科研中。同时，火力发电厂运行、维护、技术和管理人员也需要进行知识更新和技术培训。显然，一本实用、适用的教材是促进该技术推广和应用的“助推器”。

目前循环流化床锅炉教材在使用中有一些不太方便的地方：

(1) 适合高职高专学生使用的教材少。现有循环流化床锅炉书籍多为学术专著或本科教材，相当多篇幅讲述锅炉设备与试验研究等，与培养应用型人才的目标不尽一致；

(2) 大多数教材均以学习过煤粉锅炉知识作为起点进行讲解，不包括燃料与燃烧、汽水系统等锅炉的基础知识。但目前我国电厂中还有相当多运行人员没有煤粉锅炉知识，对这些人员来说，这些教材使用起来不够方便。

本教材在编写时尽量弥补了这些不足。其读者对象是运行检修人员，内容深度本着适度够用的原则，适合电厂人员自学或培训。它不仅包括了循环流化床锅炉的特有知识，还包括了锅炉的基础知识，如燃料与燃烧、汽水系统等，尽量做到“一本通”。对于有煤粉炉基础的学员，使用本书也不会有重复之感，一是因为循环流化床锅炉的汽水系统有自己的特殊性，不完全等同于煤粉锅炉；二是这些章节相对独立，教师和学员都可很方便地对内容进行取舍，有选择地学习；三是对这些章节的着墨不重，本着够用即可的原则，不会冲淡主题。

本书共分十二章，主要介绍了循环流化床锅炉的概况、锅炉基础知识、气固两相流动、燃烧与传热、物料循环燃烧系统、自然水循环系统与蒸汽净化、过热器与再热器、省煤器与空气预热器、辅机设备及系统、锅炉调试与运行、检修与维护、典型锅炉技术特点等内容。特别突出了主、辅机设备及系统描述以及运行、维护技术的讲解。

本书第一、五、九章由郑州电力高等专科学校杨建华编写，第二~四章由承德石油高等

专科学校王玉召编写，第六～八章由郑州电力高等专科学校屈卫东编写，第十、十一章由重庆电力高等专科学校陈绍敏编写，第十二章由北京博努力仿真公司王廷举编写。全书由杨建华统稿。

承蒙清华大学岳光溪院士、西安热工研究院王智微高级工程师在百忙之中审阅了本书，并提出许多宝贵意见，在此深表感谢。

循环流化床锅炉是一种正处在发展过程中的燃烧设备，设备形式和技术变化很快，本书编写时尽可能反映主流技术及最新进展，但由于编者水平和经历所限，书中难免有不妥之处，恳请同行和读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 循环流化床锅炉概述	1
第一节 电力生产与循环流化床锅炉	1
第二节 循环流化床锅炉的构成及工作过程	2
第三节 循环流化床锅炉的优缺点	3
第四节 锅炉规范及流化床锅炉分类	5
第五节 循环流化床锅炉的发展概况	6
第二章 锅炉基础知识	8
第一节 锅炉燃料	8
第二节 燃料燃烧计算	14
第三节 锅炉热平衡	20
第三章 循环流化床内的气固两相流动	25
第一节 粉体颗粒的物理特性	25
第二节 流态化过程的基本原理	31
第三节 流化床流体动力特性参数	39
第四节 循环流化床炉内的气固流动	51
第四章 循环流化床锅炉燃烧与传热	58
第一节 循环流化床锅炉的燃烧	58
第二节 循环流化床锅炉中煤的成灰特性	62
第三节 循环流化床锅炉的传热	64
第五章 物料循环燃烧系统	69
第一节 炉膛及布风装置	69
第二节 点火装置	80
第三节 气固分离器	84
第四节 固体物料回送装置	93
第五节 流化床换热器	99
第六节 物料循环系统及物料平衡	102
第六章 自然水循环系统与蒸汽净化	108
第一节 自然水循环的基本原理	108
第二节 锅炉蒸发受热面	110
第三节 汽包及蒸汽净化	112
第七章 过热器与再热器	119
第一节 概述	119
第二节 过热器和再热器的结构及工作特性	121

第三节	热偏差	123
第四节	汽温调节	125
第八章	省煤器和空气预热器	127
第一节	省煤器	127
第二节	空气预热器	129
第三节	尾部受热面的积灰、磨损和低温腐蚀	131
第九章	锅炉辅助设备及系统	136
第一节	燃料制备	136
第二节	给煤系统	142
第三节	风烟系统	146
第四节	冷渣与除灰渣设备	153
第五节	石灰石脱硫系统	162
第十章	循环流化床锅炉的调试与运行	166
第一节	循环流化床锅炉的冷态试验	166
第二节	循环流化床锅炉的启动和停炉	170
第三节	循环流化床锅炉的运行调整	177
第四节	循环流化床锅炉运行常见问题分析	186
第五节	锅炉事故	191
第十一章	循环流化床锅炉的检修与维护	200
第一节	循环流化床锅炉的防磨	200
第二节	循环流化床锅炉烘煮炉	204
第三节	循环流化床锅炉的检修	205
第四节	循环流化床锅炉的维护	207
第十二章	典型循环流化床锅炉及其技术特点	211
第一节	国外主要循环流化床锅炉技术流派及特点	211
第二节	国产 220t/h 循环流化床锅炉	216
第三节	国产 135MW 再热循环流化床锅炉	222
第四节	300MW 亚临界压力再热循环流化床锅炉	227
第五节	燃烧生物质的循环流化床锅炉	233
参考文献		237

第一章 循环流化床锅炉概述

第一节 电力生产与循环流化床锅炉

电力是一个国家经济发展的基础,是国民经济的先行官。与其他能源相比,电力具有很大的优越性,它便于转换成其他能量形式且转换效率高,便于控制和远距离传输,使用方便,所以现代社会发展对电力的依赖程度越来越高,电气化程度是衡量一个国家现代化水平的重要标志之一。

但电力不是一种天然能源,必须由其他能源转换而成。大规模的电能生产一般在电站中进行。目前的发电方式主要有火力发电、水力发电、核能发电和风力发电等。由于我国的能源以煤为主,所以火力发电是我国目前主要的发电方式,长期占我国发电总量的70%以上。

利用燃料燃烧进行发电的设备称为火力发电机组,它主要有三大设备组成,即锅炉、汽轮机和发电机。火力发电机组的发电过程如图1-1所示。

(1) 燃料在锅炉中燃烧,化学能转变成烟气的热能;烟气的热能传递给工质——水,产生高温高压的蒸汽。即在锅炉中完成燃料的化学能转变为蒸汽的热能的过程。

(2) 高温高压蒸汽进入汽轮机,体积膨胀,流速增大,蒸汽的热能转变为蒸汽流动的动能;高速气流推动汽轮机叶片转动,进一步转换为汽轮机转动的机械能。

(3) 转动的汽轮机直接驱动发电机,将机械能通过发电机的励磁转变为电能。

可见,锅炉是火力发电厂的重要设备之一。它的主要功能是,组织燃料燃烧,产生符合汽轮机需要的高温高压蒸汽,因此,锅炉在有些场合也称为蒸汽发生器。

我国是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一,火力发电厂中的锅炉绝大部分以煤为燃料。然而,煤燃烧会造成严重的环境污染,为了保护环境,实现社会的可持续发展,要求燃煤锅炉必须实现燃烧效率高、污染排放低的目标,实现这一目标必须在燃烧方式上创新。

循环流化床锅炉就是应这种需求而发展起来的一种高效、低污染的新型清洁燃烧设备。它与其他类型锅炉的主要区别在于燃烧方式不同,即炉内燃料在燃烧配风的作用下处于一种特殊的运动状态——流化状态,炉内湍流运动强烈,燃料及脱硫剂经多次循环,反复地进行低温燃烧和脱硫反应,不但能达到低 NO_x 排放、90%的脱硫效率和与煤粉炉相近的燃烧效率,而且具有燃料适应性广、负荷调节性能好、灰渣易于综合利用等优点,因此在国际上得到迅速的商业推广。在我国环保要求日益严格,电厂负荷调节范围较大、煤种多变、原煤直

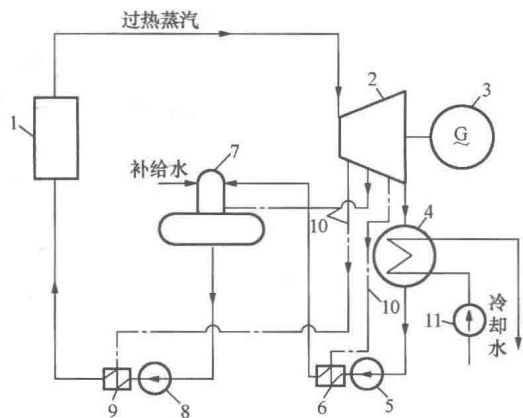


图 1-1 火力发电厂生产过程示意

- 1—锅炉; 2—汽轮机; 3—发电机; 4—凝汽器;
5—凝结水泵; 6—低压加热器; 7—除氧器;
8—给水泵; 9—高压加热器; 10—汽轮机
抽汽管; 11—循环水泵

接燃烧比例高、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首选的高效低污染燃烧设备。

第二节 循环流化床锅炉的构成及工作过程

循环流化床锅炉是由锅炉本体和辅助设备组成的。锅炉本体主要包括启动燃烧器、布风装置、炉膛、气固分离器、物料回送装置,以及布有受热面的烟道、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、省煤器及空气预热器等。辅助设备包括送风机、引风机、返料风机、碎煤机、给煤机、冷渣器、除尘器及烟囱等。一些循环流化床锅炉还有外置热交换器(external heat exchanger, EHE),也称为外置式冷灰床。图 1-2 所示为循环流化床锅炉系统示意。

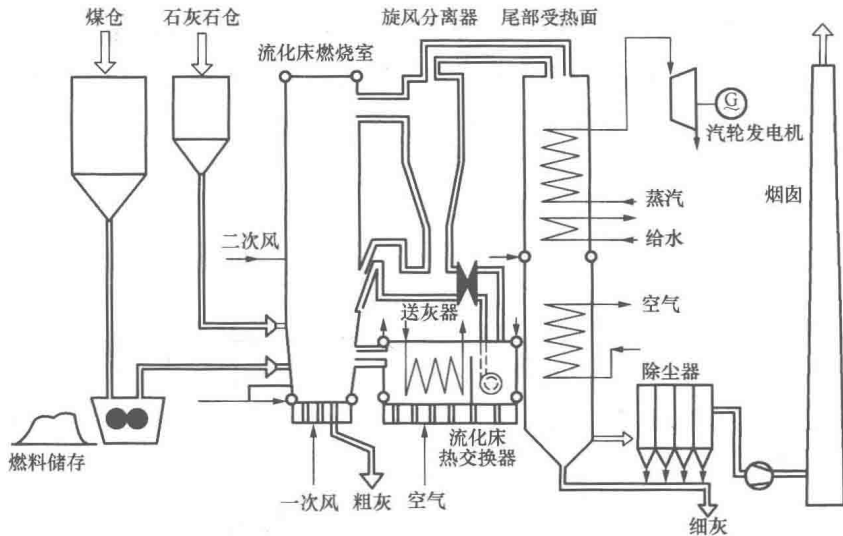


图 1-2 循环流化床锅炉系统示意

循环流化床锅炉的工作过程如下所述。

燃料及石灰石脱硫剂经破碎机破碎至合适粒度后,由给煤机和给料机从流化床燃烧室布风板上部给入,与燃烧室内炽热的沸腾物料混合,被迅速加热,燃料迅速着火燃烧,石灰石则与燃料燃烧生成的 SO_2 反应生成 CaSO_4 ,从而起到脱硫作用。燃烧室温度控制在 850°C 左右。在较高气流速度的作用下,燃烧充满整个炉膛,并有大量固体颗粒被携带出燃烧室,经气固分离器分离后,分离下来的物料通过物料回送装置重新返回炉膛继续参与燃烧。经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,由烟囱排出。

以上所述的煤、风、烟系统称为锅炉的燃烧系统,即一般说的“炉”。

燃烧系统工作的同时,汽包锅炉工质侧进行着如下过程:给水经给水泵送入省煤器预热,再进入汽包,然后进入下降管、水冷壁被加热并蒸发后又回到汽包并经汽、水分离,分离出的水继续进入下降管循环,分离出的蒸汽经过热器升温后,通过主蒸汽管道送入汽轮机做功。

上述为汽水系统,即一般说的“锅”。

总的来说,炉的任务是尽可能组织高效的放热,锅的任务是尽量把炉内的热量有效地吸收,锅和炉组成了一个完整的能量转换和蒸汽生产系统。

与其他燃煤方式相比,循环流化床燃烧方式有以下特点:

(1) 燃料制备系统相对简单。循环流化床锅炉无须复杂的制粉系统,只需简单的干燥及破碎装置即可满足燃烧要求。

(2) 燃料处于流化状态下燃烧。炉内始终有大量的炽热物料处于流化状态,新加入燃料能被迅速加热并着火燃烧。流化状态使燃料和助燃气体接触更充分,燃烧条件更好。大量热物料也是炉内传热的主要载体,能加强炉内传热。

(3) 循环流化床锅炉的燃烧温度较低,一般为 $850\sim 950^{\circ}\text{C}$,这个温度是石灰石脱硫反应的最佳温度。

(4) 有物料循环系统,燃料循环燃烧,使燃烧更完全。循环流化床锅炉由流化床燃烧室、物料分离器和回料阀送灰器构成了其独有的物料循环系统,这是循环流化床锅炉区别于其他锅炉的一大结构特点。

(5) 能实现燃烧过程中脱硫。与燃料同时给入的脱硫剂石灰石能与燃料燃烧生成的 SO_2 反应生成 CaSO_4 ,从而起到脱硫作用。这是循环流化床锅炉的最大环保优势,因为其他燃烧方式很难实现燃烧过程中的高效脱硫。

(6) 采取分段送风燃烧方式。一次风经布风板送入燃烧室,二次风在布风板上方一定高度送入。因此,在燃烧室下部的密相区为欠氧燃烧,形成还原性气氛。在二次风口上部为富氧燃烧,形成氧化性气氛。通过合理调节一、二次风比,可维持理想的燃烧效率并有效地控制 NO_x 生成量。

以上特点决定了循环流化床锅炉是一种高效、低污染的清洁燃烧设备。

循环流化床锅炉就是根据其燃烧系统的特点而命名的,“循环”指离开炉膛的燃料可以被重新送回炉内,循环燃烧,以提高燃烧效率;“流化床”指炉内燃料处在流化状态下燃烧。“循环流化床”的英文名称是“circulating fluidized bed”,缩写为“CFB”,所以在很多场合把“循环流化床锅炉”简称为“CFB 锅炉”。

第三节 循环流化床锅炉的优缺点

一、循环流化床锅炉的优点

1. 燃料适应性广

循环流化床锅炉独特的燃烧方式使得它几乎可以燃烧各种固体燃料,如泥煤、褐煤、烟煤、贫煤、无烟煤、洗煤厂的煤泥、洗矸、煤矸石、焦炭、油页岩等,并能达到很高的燃烧效率。它的这一优点对充分利用劣质燃料具有重大意义。

2. 有利于降低污染气体排放

向循环流化床锅炉内直接加入石灰石、白云石等脱硫剂,可以脱去燃料在燃烧过程中生成的 SO_2 。根据燃料中含硫量的大小确定加入的脱硫剂量,可达到 90% 的脱硫效率。另外,循环流化床锅炉燃烧温度一般控制在 $850\sim 950^{\circ}\text{C}$ 的范围内,这不仅有利于脱硫,而且可以抑制热反应型氮氧化物 (NO_x) 的形成;由于循环流化床锅炉普遍采用分段(或分级)送入二次风,这样又可控制燃料型 NO_x 的产生。一般情况下,循环流化床锅炉 NO_x 的生成

量仅为煤粉炉的 1/4~1/3。因此,循环流化床燃烧是一种经济、高效、低污染的燃烧技术。

3. 负荷调节性能好

循环流化床锅炉负荷调节幅度一般为 30%~110%额定负荷,即在 30%额定负荷甚至更低的负荷情况下,循环流化床锅炉也能保持燃烧稳定,甚至可以压火备用,这一特点特别适用于调峰电厂或热负荷变化较大的热电厂。

4. 灰渣综合利用性能好

循环流化床锅炉燃烧温度低,灰渣不会软化和黏结,活性较好。另外,炉内加入石灰石后,灰渣成分也有变化,含有一定的 CaSO_4 和未反应的 CaO 。循环流化床锅炉灰渣可以用于制造水泥的掺和料或其他建筑材料的原料,有利于灰渣的综合利用。这一点对于那些建在城市或对环保要求较高的电厂采用循环流化床锅炉十分有利。

二、循环流化床锅炉的缺点

循环流化床锅炉与常规煤粉炉相比还存在一些问题。

1. 大型化问题

尽管循环流化床锅炉发展很快,已投运的单炉容量已达 2000t/h,但由于受技术和辅助设备的限制,与煤粉炉相比,目前循环流化床锅炉的单机容量还偏小,无法在火力发电领域成为主力炉型。

2. 烟风系统阻力较高,风机用电量

因为循环流化床锅炉布风板及床层阻力大,而烟气系统中又增加了气固分离器的阻力,所以烟风系统阻力高。循环流化床锅炉需要的风机压头高,风机数量多,故风机用电量,这会增加电厂的生产成本。

3. 自动控制较难实现

由于影响循环流化床锅炉燃烧状况的因素较多,各型锅炉调整方式差异较大,所以采用计算机自动控制比常规锅炉难得多。

4. 磨损问题

循环流化床锅炉的燃料粒径较大,并且炉膛内物料浓度是煤粉炉的十至几十倍。虽然采取了许多防磨措施,但在实际运行中,循环流化床锅炉受热面的磨损速度仍比常规锅炉大得多。因此,受热面磨损问题可能成为影响锅炉长期连续运行的重要原因。

5. 对辅助设备要求较高

某些辅助设备,如冷渣器或高压风机的性能或运行问题都可能严重影响锅炉的正常安全运行。

6. 理论和技术问题

循环流化床锅炉虽已有千余台投入运行,但仍有许多基础理论和设计制造技术问题没有根本解决。至于运行方面,还没有成熟的经验,更缺少统一的标准,这就给电厂设备改造和运行调试带来了诸多困难。

上述问题在循环流化床锅炉的发展过程中大多已经得到较好的解决。如恰当的炉膛设计可完全避免水冷壁的磨损;正确选择和设计分离器,既可保证很高的分离效率,也能避免自身的磨损;冷渣器 and 高压风机等主要辅助设备随着循环流化床锅炉的发展,也都有了成熟的产品。风机问题则是单就烟风系统阻力而言,如果考虑到煤粉炉需要复杂的制粉系统而链条炉效率低且无脱硫效果,则风机用电量的少量增加是完全可以接受的。

第四节 锅炉规范及流化床锅炉分类

一、锅炉规范

锅炉的主要技术规范是指锅炉容量、锅炉蒸汽参数和给水温度等，它们用来说明锅炉的基本工作特性。

1. 锅炉容量

锅炉容量指锅炉在额定蒸汽参数、给水温度和设计燃料条件下每小时的最大连续蒸发量 (maximum continuous rating, MCR)，又称为锅炉的额定容量或额定蒸发量，常用符号 D_e 表示，单位为 t/h (或 kg/s)。例如 135MW 汽轮发电机组配用的锅炉容量为 440t/h。

锅炉容量是表明锅炉产汽能力大小的特性数据。考虑现阶段我国锅炉工业发展情况，锅炉容量的划分是： $D_e < 220$ t/h 为小型锅炉； $D_e = 220 \sim 410$ t/h 为中型锅炉； $D_e > 670$ t/h 为大型锅炉。但上述分类是相对的，随着锅炉容量日益增大，目前大型锅炉若干年后只能算中型。

2. 锅炉蒸汽参数

通常是指锅炉过热器出口处的过热蒸汽压力和温度。蒸汽压力用符号 p 表示，单位为 MPa。例如：200MW 汽轮发电机组配用的超高压锅炉，其蒸汽压力为 13.73MPa (表压力)，蒸汽温度为 540℃。

当锅炉具有中间再热时，蒸汽参数还应包括再热蒸汽压力和温度。

锅炉蒸汽参数是说明锅炉蒸汽规范的特性数据。按蒸汽压力锅炉可大致分为以下几类：

$p \leq 1.27$ MPa (13kgf/cm²) 为低压锅炉；

$p = 2.45 \sim 3.8$ MPa (25~38kgf/cm²) 为中压锅炉；

$p = 9.8$ MPa (100kgf/cm²) 为高压锅炉；

$p = 13.7$ MPa (140kgf/cm²) 为超高压锅炉；

$p = 16.7$ MPa (170kgf/cm²) 为亚临界压力锅炉；

$p \geq 22.1$ MPa (225.56kgf/cm²) 为超临界压力锅炉。

3. 给水温度

锅炉给水温度是指水在省煤器入口处的温度。不同蒸汽参数的锅炉其给水温度也不相同。

二、国产锅炉型号

锅炉型号反映锅炉的基本特征。我国锅炉目前采用三组或四组字码表示其型号。一般中、高压锅炉用三组字码表示。例如 HG-440/13.7-L.PM 型锅炉，型号中第一组字码是锅炉制造厂名称的汉语拼音缩写，HG 表示哈尔滨锅炉厂 (SG 表示上海锅炉厂，DG 表示东方锅炉厂，WG 表示武汉锅炉厂等)；型号中的第二组字码为一分数，分子表示锅炉容量 (t/h)，分母表示过热蒸汽压力 (kgf/cm² 或 MPa，表压)；型号中第三组字码表示产品的设计燃料、设计序号等。如前述 HG-440/13.7-L.PM4 型锅炉即表示哈尔滨锅炉厂制造，容量为 440t/h，过热蒸汽压力为 13.7MPa，流化床锅炉，设计燃料为贫煤。

超高压以上的发电机组均采用蒸汽中间再热，即锅炉装有再热器，故用四组字码表示。即在上述型号的二、三组字码间又加了一组字码，该组字码也为一分数，其分子表示过热蒸

汽温度,分母表示再热蒸汽温度。例如 DG-670/13.7-540/540-5 型锅炉即表示东方锅炉厂制造,容量为 670t/h,过热蒸汽压力为 140kgf/cm^2 (13.7MPa,表压),过热蒸汽温度为 540°C ,再热蒸汽温度为 540°C ,第 5 次设计的锅炉。

三、循环流化床锅炉分类

大部分循环流化床锅炉在常压下运行,称为常压流化床锅炉,还有一类流化床锅炉在高压的容器内运行,称为增压流化床锅炉。本书所介绍的流化床锅炉均为常压流化床锅炉,一般习惯称为流化床锅炉。

由于循环流化床锅炉还处于发展阶段,各种结构的炉型繁多,炉内传热和动力特性差异较大,分类比较复杂。按不同分类方法可以把循环流化床锅炉进行如下分类。

(1) 以炉内流化状态来分,有鼓泡床、湍流床和快速床的循环流化床锅炉。

(2) 以分离器处烟气温度高低来分,有高温分离循环流化床锅炉、中温分离循环流化床锅炉和低温循环流化床锅炉。

(3) 以锅炉自身的特点和开发研究厂商分类,有如奥斯龙公司的“百宝炉”,福斯特惠勒的“FW 型”炉以及鲁奇公司的“鲁奇型”循环流化床锅炉等。

(4) 以物料的循环倍率高中低来分,有低循环倍率循环流化床锅炉,循环倍率 $K < 15$; 中循环倍率循环流化床锅炉, $K = 15 \sim 40$; 高循环倍率循环流化床锅炉, $K > 40$ 。

早期的循环流化床锅炉称为循环床锅炉,其特点是炉内为快速床,外加物料循环系统,其循环倍率一般都是较高的。由于流化速度较高,受热面磨损严重。目前循环流化床锅炉流化速度上限在 8m/s 左右,一般在 6m/s 以下。实际上一台循环流化床锅炉燃烧室内流化速度常常是一个变值,因此物料流化状态也在变化,有时是快速床,有时可能是湍流床,有时甚至是鼓泡床,因此循环流化床锅炉的叫法比循环床锅炉更确切。

第五节 循环流化床锅炉的发展概况

流化床技术于 20 世纪 20 年代初,在德国首先应用于工业。此后,美国、德国、法国、芬兰和英国等发达国家均开始研究开发及应用流化床技术,尤其是其在石油催化裂化过程中的应用,更是加快了该技术的发展。至 20 世纪 40 年代,流化床技术几乎在各工业部门(如石油、化工、冶炼、粮食、医药等)中都得到了广泛的应用。通过这些应用,大大地提高了其技术水平和理论水平。

流化床技术真正用于煤的燃烧,即流化床煤燃烧是在 20 世纪 60 年代初。由于当时对能源的需求量不断增加,世界能源供应开始紧张,各国才重视能源问题,千方百计开源节流。于是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。

现在一般把早期发展的不带物料分离和回送系统的流化床锅炉称为“鼓泡流化床锅炉”,以与“循环流化床锅炉”相区别。我国对鼓泡流化床锅炉的研究起步较早,1965 年,第一台燃油母页岩的流化床锅炉在广东茂名投产成功,此后,鼓泡床锅炉在全国得到迅猛发展,循环流化床锅炉出现之前已达 3000 多台,最大容量 130t/h,东方锅炉厂与国外合作生产制造的 220t/h 锅炉还出口巴基斯坦等国家。

但是,鼓泡床锅炉存在一些问题,如飞灰可燃物大、埋管受热面磨损严重、大型化困难、石灰石脱硫时钙的利用率较低等,制约了其进一步发展。为了解决上述问题,20 世纪

80年代循环流化床锅炉应运而生。

经过三十多年的迅速发展,循环流化床锅炉的技术已趋于成熟。无论是锅炉本身的大型化还是各种配套技术和设备,都已经能适应用户的不同要求。从某种意义上来说,对环境保护的日益严格的要求促进了循环流化床锅炉的商业应用,因而在某种程度上,循环流化床锅炉的理论研究还相对落后一些。

循环流化床锅炉由最初的每小时几十吨蒸发量已发展到现在的每小时上千吨,由工业锅炉扩展到电站锅炉,得益于国际上一些公司在该领域的卓越贡献。尤其是德国的鲁奇公司、芬兰的奥斯龙公司、美国的福斯特惠勒公司和德国的斯泰米勒公司等,在开发和研制循环流化床锅炉技术中都有突出的成就,如鲁奇公司的外置床技术、奥斯龙公司的“百宝炉”、福斯特惠勒公司的水冷旋风分离器和斯泰米勒公司的炉内惯性分离等。1996年4月投入商业运行的法国普罗旺斯电厂配250MW机组的700t/h亚临界压力循环流化床锅炉是循环流化床锅炉技术发展史上的里程碑,它是循环流化床锅炉大型化的标志。

我国对循环流化床锅炉技术的研究和开发起步稍晚,直至1989年11月,第一台35t/h锅炉才在山东明水电厂投入运行。但近二十年国内在开发和研制循环流化床锅炉技术方面发展迅猛。中国科学院、清华大学、西安热工研究院有限公司、浙江大学、华中理工大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学等科研单位、高等学校与锅炉制造厂合作开发研制出具有自主知识产权的多种技术的循环流化床锅炉。另外,哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、东方锅炉厂等积极与国外合作,联合研制生产大型循环流化床锅炉。我国现有不同容量的循环流化床锅炉3000台左右投入商业运行,其中410~480t/h(100~150MW)等级的循环流化床锅炉达到150多台。在大型CFB锅炉的技术引进及国产化方面,国内首台引进法国阿尔斯通公司的300MW CFB锅炉于2006年4月在四川白马CFB示范电站建成投运,目前在建与拟建的300MW循环流化床锅炉机组近百台,超过了世界上其他国家的总和;600MW超临界循环流化床锅炉机组已于2013年4月投运。各方面的共同努力使我国目前在循环流化床锅炉技术的应用方面处于世界领先地位。

随着国家环境政策的日趋严格,作为一种高效、低污染的清洁燃烧设备,循环流化床锅炉将在能源环保领域发挥越来越重要的作用。

第二章 锅炉基础知识

第一节 锅炉燃料

用于产生热量的可燃物质称为燃料。

电站锅炉只有不断地向炉膛供给燃料，才能保证生产过程连续不断地进行；燃料与锅炉有着密切的关系，燃料性质是锅炉设计和运行的重要依据。为了保证锅炉安全经济地运行，首先应对燃料的性质及其对锅炉工作的影响有足够的认识。

燃料按其物态可分为固体、液体、气体三大类，而每一类又可按其获得的方法不同分为天然燃料和人工燃料两大类。

为了合理、充分地利用资源，电力部门在选用燃料时应遵循以下原则：火力发电厂一般应燃用其他部门不便利用的劣质燃料；尽可能采用当地燃料，建设坑口电站；提高燃料的使用经济效果，节约能源；尽量减少燃料燃烧生成物对环境的污染。

一、煤的成分及其性质

1. 元素分析

全面测定煤中所含化学成分的分析叫元素分析。根据分析，煤中所含元素可达三十几种。一般将不可燃物质都归入灰分。这样，对燃烧有影响的成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分，各化学元素成分用质量百分数表示。

碳是煤中含量最多的可燃元素，也是发热量的主要来源。每千克纯碳的发热量为 3.27×10^4 kJ。煤中的碳一部分与氢、氧、氮和硫结合成挥发性有机化合物，其燃点较低，其余呈单质状态的为固定碳，其燃点高，不易着火和燃尽，但发热量大。

氢是煤中发热量最高的物质，完全燃烧时，纯氢的发热量为 1.2×10^5 kJ/kg。氢燃点低，易点燃，是利元素。但煤中氢的含量较少，一般占3%~6%。

煤中的氧和氮是不可燃物质，其含量也较少。煤中的氮在高温条件下易生成污染大气的 NO_x ，被视为有害元素。

硫虽然在燃烧时也放出热量，但其燃烧产物 SO_2 和 SO_3 会造成锅炉金属的腐蚀并污染大气。煤中的硫常以三种形式存在，即有机硫、硫化铁硫、硫酸盐硫。前两种可燃，称为挥发硫（可燃硫），后一种归入灰分。一般在计算含硫量时应采用全硫分。

煤中灰分和水分均为不可燃物质。灰分存在不仅使燃料发热量减少，而且影响燃料着火燃尽，也是造成积灰、结渣、磨损的主要因素。水分会使炉内温度下降，影响着火，并增大排烟热损失，还会加剧尾部受热面的腐蚀和堵灰。

煤中的水分在自然干燥条件下失去的部分，称为外部水分，剩余部分为内部水分，两部分之和为全水分。

2. 工业分析

煤的工业分析是利用煤在加热燃烧过程中的失重进行定量分析的，目的是测定煤的水分、挥发分、固定碳和灰分的成分。

将风干（达到空气干燥状态）的煤样置于 $102 \sim 105^\circ\text{C}$ 的恒温干燥箱内，烘干2h，所失

去的重量为煤的固有水分, 又称内在水分 (M_{inh})。风干过程中失去的水分称为外在水分 (M_f), 是风雪雨露和开采过程中进入的水分。煤的全水分 (M_t) 包括外在水分和内在水分。把干燥后的试样置于 900°C 高温电炉中, 隔绝空气加热 7min , 所挥发出来的气体称挥发分 (V)。煤失去水分和挥发分的剩余部分称为焦炭。将焦炭置于 850°C 电炉中灼烧 2h 后残余物为灰分 (A), 而在灼烧过程中所失去的重量为固定碳 (FC)。

挥发分含量是评定煤燃烧性能的一个重要指标, 挥发分中大部分是可燃气体, 如 CO 、 H_2 、 C_mH_n 等, 还含有少量不能燃烧的气体, 如 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 等。挥发分容易着火燃烧, 挥发分着火后对焦炭产生强烈的加热作用, 促使其迅速着火燃烧; 同时挥发分析出后会使焦炭变得比较松散而多孔, 有利于燃烧过程的发展。因此, 挥发分多的煤, 容易着火, 燃烧反应快, 燃烧比较完全。

煤中水分、挥发分析出后剩下的残留物称为焦炭, 它包括固定碳及灰分。焦炭的黏结性与强度称为煤的焦结性。不同煤的焦结性差异很大, 有的焦炭呈粉末状即不焦结; 有的焦结性很强, 结成硬焦块。煤的焦结性对层燃炉影响较大, 对煤粉炉工作影响不大。

由于工业分析比较简单迅速, 同时通过工业分析成分可以了解煤在燃烧方面的特性, 所以火力发电厂中通常采用工业分析。

3. 煤成分的计算基准及其换算

由于煤中灰分和水分含量容易受外界条件的影响而发生变化, 所以单位质量的煤中其他成分的质量百分数也会随之而变化。即使是同一种煤, 由于煤样在露天的存放时间不同, 全水分也会不同。因此, 需要根据煤存在的条件或根据需要而规定的“成分组合”作为基准, 才能正确地反映煤的性质。常用下列四种基准:

(1) 收到基 (原应用基)。以收到状态的煤样 (实际是取样) 为基准计算煤中全部成分的组称收到基, 其中包括全部水分。收到基以下角标 ar 表示, 即

$$\text{元素分析: } C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + S_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100\% \quad (2-1)$$

$$\text{工业分析: } \text{FC}_{\text{ar}} + V_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100\% \quad (2-2)$$

(2) 空气干燥基 (原分析基)。煤样在实验室规定条件下自然干燥, 失去外部水分后, 其余的成分组合便是空气干燥基, 以下角标 ad 表示, 即

$$\text{元素分析: } C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + S_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100\% \quad (2-3)$$

$$\text{工业分析: } \text{FC}_{\text{ad}} + V_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100\% \quad (2-4)$$

(3) 干燥基。以假想无水状态煤为基准, 以下角标 d 表示。由于已不受水分的影响, 灰分含量百分数比较稳定, 可用于比较两种煤的含灰量, 即

$$\text{元素分析: } C_{\text{d}} + H_{\text{d}} + O_{\text{d}} + N_{\text{d}} + S_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100\% \quad (2-5)$$

$$\text{工业分析: } \text{FC}_{\text{d}} + V_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100\% \quad (2-6)$$

(4) 干燥无灰基 (原可燃基)。以假想无水、无灰状态的煤为基准, 以下角标 daf 表示。由于不受水分、灰分影响, 常用于比较两种煤中的碳、氢、氧、氮、硫成分含量的多少, 特别是通过挥发分和固定碳的相对比例含量可简单用于判断煤的着火特性和燃尽特性, 即

$$\text{元素分析: } C_{\text{daf}} + H_{\text{daf}} + O_{\text{daf}} + N_{\text{daf}} + S_{\text{daf}} = 100\% \quad (2-7)$$

$$\text{工业分析: } \text{FC}_{\text{daf}} + V_{\text{daf}} = 100\% \quad (2-8)$$

煤成分各基准之间的关系如图 2-1 所示。

对同一种煤, 各基准间可进行换算, 其换算系数 K 见表 2-1。



图 2-1 煤成分及基准间的关系

表 2-1 不同基准的换算系数 K

已知 \ 所求	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100-M_{ad}}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-A_{ar}-M_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100-M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100-M_{ad}}$	$\frac{100}{100-A_{ad}-M_{ad}}$
干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100-A_{ar}-M_{ar}}{100}$	$\frac{100-A_{ad}-M_{ad}}{100}$	$\frac{100-A_d}{100}$	1

二、煤的特性

(一) 煤的发热量

1. 煤的发热量

煤的发热量是指单位质量的煤在完全燃烧时放出的热量。在实际应用中,煤的发热量有高位发热量和低位发热量之分,发热量的单位为 kJ/kg。

当发热量中包括煤燃烧后所产生的水蒸气凝结放出的汽化潜热时,称为高位发热量,用 Q_{gr} 表示。

当发热量中不包括水蒸气凝结放出的汽化潜热时,称为低位发热量,用 Q_{net} 表示。

现代大容量锅炉为防止尾部受热面低温腐蚀,排烟温度一般均在 120°C 以上,烟气中的水蒸气在常压下不会凝结,汽化潜热未被利用。因此,我国在锅炉的有关计算中采用低位发热量。

收到基高位发热量与低位发热量之间的关系见式 (2-9),其他可类推。

$$Q_{net, ar} = Q_{gr, ar} - 225H_{ar} - 25M_{ar} \quad (2-9)$$

不同基准燃料的发热量是不同的,在进行不同基准燃料发热量之间的换算时,应考虑水分的影响。对于高位发热量来说,水分存在只是占据质量的一部分,使可燃成分减少,导致发热量降低。因此,高位发热量之间可以采用像不同基准成分换算一样,选用相应的换算系数直接换算即可。

不同基准燃料低位发热量的换算可以按下述方法进行:先将已知的低位发热量换算成同基准的高位发热量,然后查出相应的换算系数,进行不同基准的高位发热量的换算,求出所