

普通高等学校能源与动力  
“十二五”规划教材

# 锅炉原理

▶▶ 陈刚 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等学校能源与动力“十二五”规划教材

# 锅炉原理

主 编 陈 刚  
参 编 刘 豪 丘纪华 张世红  
张小平 向 军 胡 松  
方庆艳 张 成

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书按照“锅炉原理”教学大纲的要求编写,密切结合热能动力专业的教学要求,全面系统地介绍了锅炉的工作原理、燃烧理论及计算方法。内容包括:锅炉的构成及主要系统;锅炉用燃料、燃料的燃烧计算和锅炉机组热平衡;煤粉制备;燃烧的基本理论及燃烧设备;燃烧污染控制及新型燃烧技术;自然循环和强制流动锅炉的汽水系统及水动力计算;受热面布置及工作特点;蒸汽净化;锅炉热力计算;各受热面主要运行问题;运行调节和启停方法等。结合工程实际,书中还介绍了近年来电站锅炉设备在设计、生产、运行中的新技术、新工艺,以及国内外锅炉技术的新成就。该书力求体现实践性、系统性和先进性。

本书是高等学校热能动力类专业本科(专科)的教材,也可供火力发电厂和锅炉制造行业的工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

锅炉原理/陈 刚 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2012.2  
ISBN 978-7-5609-7498-9

I. 锅… II. 陈… III. 锅炉-高等学校-教材 IV. TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 232388 号

锅炉原理

陈 刚 主编

责任编辑:刘 勤

封面设计:刘 卉

责任校对:朱 霞

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:29.25

字 数:636千字

版 次:2012年2月第1版第1次印刷

定 价:49.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

本书是根据本专业教学改革的需要、按照热动力类专业教学指导委员会锅炉教学组通过的教学大纲而编写的,力求反映我国锅炉方面科学研究最新科技成果,既能适应学时要求、又能拓宽读者的专业知识面。

本书以锅炉安全、经济运行为主导,重点介绍锅炉高效、低污染燃烧和工质流动、传热的基础理论和技术。在内容取材方面,反映了现代大型电站锅炉的结构、运行特点及本学科国内外技术发展的最新成就,以加强本教材的实践性、新颖性和综合性。

全书共分十二章。第1章为锅炉机组概述,介绍了锅炉的现状与发展趋势。第2章以固体燃料(煤)为主,介绍了燃料的成分及其对锅炉工作的影响;阐述了燃料的燃烧计算、锅炉机组热平衡及燃烧过程的基础理论。第3章主要介绍了煤粉的特性、磨煤机及制粉系统。第4章介绍了煤粉火焰高效燃烧技术、煤粉燃烧器及其布置、煤粉炉的点火装置及循环流化床燃烧技术。第5章介绍了燃烧污染物控制及新型燃烧技术。第6章介绍了锅炉水动力特性、传热与水循环的安全性、超(超)临界压力下汽水的理化特性对传热特性和水动力特性的影响,以及锅炉机组运行调节和启停方法。第7章及第11章分别介绍了锅炉受热面的结构形式、工作特点及受热面的运行问题。第8章介绍了蒸汽的净化。第9章、第10章和第12章分别介绍了锅炉的热力计算及电站锅炉的设计与布置。

本书由华中科技大学陈刚教授任主编,第1章、第8章、第11章由陈刚、张成编写,第2章由刘豪编写,第3章、第9章、第10章由方庆艳编写,第4章由丘纪华、张世红编写,第5章由向军、胡松编写,第7章由丘纪华编写,第6章、第12章由张小平编写。

本书在编写过程中参考了各院校相关的教材及各大型火电厂、锅炉厂、电力设计院和研究所的有关资料、文献,特向有关作者表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年8月

# 目 录

<b>第 1 章 锅炉机组概述</b> .....	(1)
1.1 锅炉机组的构成及主要系统 .....	(1)
1.2 锅炉的参数及其主要特征指标 .....	(5)
1.3 锅炉分类 .....	(7)
1.4 国内外锅炉发展概况 .....	(10)
<b>第 2 章 锅炉燃料燃烧及热平衡计算</b> .....	(14)
2.1 煤的组成与分类 .....	(14)
2.2 油和气体燃料 .....	(26)
2.3 燃料的燃烧计算 .....	(28)
2.4 锅炉的热平衡 .....	(38)
2.5 燃烧化学反应动力学基础 .....	(46)
2.6 煤的燃烧特性 .....	(51)
<b>第 3 章 煤粉制备及其系统</b> .....	(60)
3.1 煤粉的特性及品质 .....	(60)
3.2 磨煤机和制粉系统的选择 .....	(65)
3.3 钢球磨煤机及制粉系统 .....	(67)
3.4 中速磨煤机及制粉系统 .....	(73)
3.5 风扇式磨煤机及制粉系统 .....	(78)
3.6 制粉系统的其他部件 .....	(79)
<b>第 4 章 燃烧设备和煤粉燃烧技术</b> .....	(85)
4.1 煤粉高效燃烧技术 .....	(85)
4.2 煤粉炉的炉膛及燃烧器 .....	(94)
4.3 直流燃烧器及其布置 .....	(98)
4.4 旋流燃烧器及其布置 .....	(109)
4.5 W 型火焰燃烧技术 .....	(117)
4.6 煤粉炉的点火装置 .....	(122)
4.7 流态化状态及特征 .....	(134)
4.8 循环流化床锅炉工作原理和主要特点 .....	(146)
4.9 循环流化床锅炉的燃烧及运行 .....	(153)

4.10	循环流化床锅炉的现状与发展趋势	(162)
<b>第5章</b>	<b>燃烧污染控制及新型燃烧技术</b>	(172)
5.1	煤粉燃烧排放物对环境的污染	(172)
5.2	二氧化硫(SO <sub>2</sub> )的生成机理和控制技术	(174)
5.3	氮氧化物的生成机理和控制技术	(178)
5.4	循环流化床 N <sub>2</sub> O 的生成机理与控制技术	(185)
5.5	重金属(汞)的排放与控制	(192)
5.6	颗粒物的形成及除尘技术	(198)
5.7	CO <sub>2</sub> 减排技术	(202)
5.8	新型燃烧技术	(206)
<b>第6章</b>	<b>锅炉水动力特性与传热</b>	(212)
6.1	锅炉水动力学基础	(212)
6.2	自然循环锅炉的水循环及其计算	(222)
6.3	自然循环故障及可靠性校验	(234)
6.4	强制流动锅炉及其水动力特性与传热	(241)
6.5	直流锅炉的启停特点	(264)
<b>第7章</b>	<b>锅炉受热面及其工作特点</b>	(276)
7.1	锅炉蒸发受热面及系统	(276)
7.2	过热器与再热器	(294)
7.3	省煤器与空气预热器	(325)
<b>第8章</b>	<b>汽包及蒸汽净化</b>	(341)
8.1	汽包	(341)
8.2	蒸汽净化和汽包内部装置	(344)
8.3	大型机组锅炉典型的汽包和汽包内部装置	(358)
<b>第9章</b>	<b>炉膛传热计算</b>	(365)
9.1	炉内的传热基本方程	(365)
9.2	炉内传热计算的相似理论方法	(367)
9.3	炉膛黑度	(369)
9.4	炉膛水冷壁的面积及角系数	(371)
9.5	炉膛热负荷分配	(373)
<b>第10章</b>	<b>半辐射和对流受热面的传热计算</b>	(374)
10.1	对流传热计算的基本公式	(374)
10.2	传热温压	(376)

---

10.3	传热系数	(380)
10.4	对流受热面面积与介质速度	(396)
<b>第 11 章</b>	<b>锅炉受热面运行问题</b>	<b>(398)</b>
11.1	积灰与结渣	(398)
11.2	受热面的磨损	(413)
11.3	受热面的腐蚀	(422)
11.4	材料问题	(435)
<b>第 12 章</b>	<b>电站锅炉本体的设计与布置</b>	<b>(444)</b>
12.1	锅炉热力计算方法	(444)
12.2	锅炉本体的典型布置特点	(447)
12.3	锅炉主要设计参数的选择	(453)
<b>参考文献</b>		<b>(458)</b>

# 第 1 章 锅炉机组概述

火力发电厂的生产过程,实际上就是将一次能源(如煤、油及天然气等燃料)转化为二次能源(电力)的能量转换过程。其基本的生产过程为:燃料的化学能→蒸汽的热能→转子的机械能→电能。以上能量之间的转换分别在锅炉、汽轮机和发电机中实现。所以锅炉是火力发电厂的三大主机之一,它的作用是将水变成高温高压的蒸汽。

## 1.1 锅炉机组的构成及主要系统

电站锅炉的工作过程由燃料的燃烧放热过程(炉内过程)、燃烧产物(烟气)通过换热面向水、蒸汽等工质传热过程及工质的吸热汽化过程(锅内过程)所组成。

电站锅炉系统主要包括制粉和燃烧系统、汽水系统和烟风系统等,它们与各种辅助系统及其连接管道、炉墙构架等组成了锅炉机组。图 1-1 所示为一台自然循环煤粉锅炉的主要构成。下面分别介绍锅炉的几个主要系统。

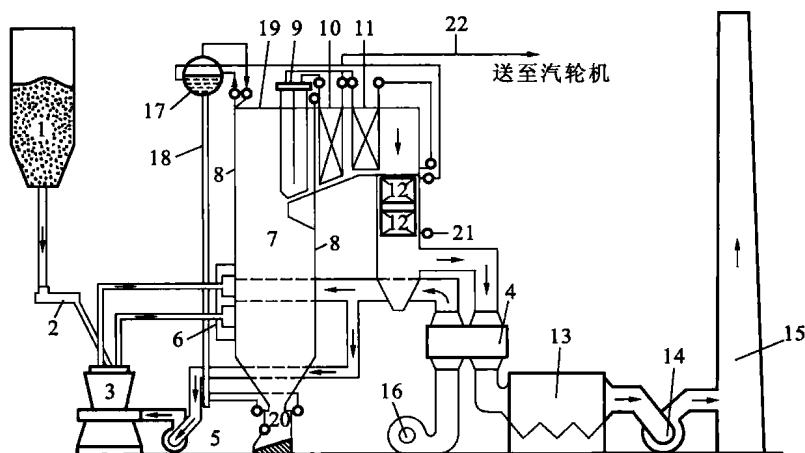


图 1-1 煤粉锅炉机组示意图

- 1—原煤仓;2—给煤机;3—磨煤机;4—空气预热器;5—排粉风机;  
6—燃烧器;7—炉膛;8—水冷壁;9—屏式过热器;10—高温过热器;  
11—低温过热器;12—省煤器;13—除尘器;14—引风机;15—烟囱;16—送风机;  
17—汽包;18—下降管;19—顶棚过热器;20—排渣管;21—给水管道;22—过热蒸汽出口

### 1.1.1 制粉和燃烧系统

制粉和燃烧系统包括原煤仓、磨煤机、煤粉分离器、燃烧器、燃烧室(炉膛),以及相应的煤粉输送设备(送风机)及管路。该系统向锅炉提供符合要求的煤粉,组织煤



粉和气流的合理流动,在炉内实现煤粉的良好燃烧。

由原煤仓 1 落下的煤经给煤机 2 送入磨煤机 3 磨制成煤粉。煤在磨制的过程中需要用热空气干燥和输送。送风机 16 将冷空气送入锅炉的尾部空气预热器 4,冷空气经过空气预热器后被烟气加热。热空气的一部分经过排粉风机 5 送入磨煤机,将煤加热干燥,同时作为输送煤粉的介质。从磨煤机排除的气粉混合物经燃烧器 6 进入炉膛 7 中燃烧。经过空气预热器的另一部分热空气则直接进入燃烧器参与燃烧。

### 1.1.2 汽水系统

锅炉机组的汽水系统是指水作为锅炉的传热介质,在锅炉内由给水变成过热蒸汽的过程中所流经的设备及系统。进入锅炉的水称为给水,由给水到过热蒸汽的中间要经历一系列的加热过程。首先是给水被加热到饱和温度,其次是饱和水的蒸发汽化,最后是饱和蒸汽的过热。加热给水的受热面为省煤器 12。饱和水转变为饱和蒸汽的受热面称为蒸发受热面,在炉内水冷壁 8 中完成。把饱和蒸汽加热为过热蒸汽的受热面称为过热器,温度由高至低可分为高温过热器 10 和低温过热器 11。依水、汽的流动方向,从给水管道 21 开始,经省煤器 12、汽包 17(下部水侧)、下降管 18、水冷壁 8 及其引出管、汽包(上部汽侧)和过热器 19,至过热蒸汽出口 22 为止;对于具有蒸汽再热的锅炉机组,汽水系统还包括再热器(图中未画出),同时也成为二次过热器。汽水系统的主要作用是将燃料所释放的热量,通过与相关受热面的热交换,安全可靠和高效地传递给受热面内的工质,使锅炉给水受热、蒸发汽化和过热,产生符合要求的过热蒸汽。再热器的作用则是把在汽轮机高压缸中做过功的蒸汽再次加热到较高的额定温度,重新返回汽轮机做功。

### 1.1.3 烟风系统

锅炉的烟风系统主要包括送风机、引风机、排粉风机、脱硫除尘装置和烟囱等设备。送风机的作用是为炉膛输送氧气,并且要使炉膛处于欠氧燃烧状态,以此来防止过多氮氧化物( $\text{NO}_x$ )的生成。引风机的作用是保持炉膛微负压。排粉风机的作用是向炉膛输送煤粉。值得注意的是,输送到炉膛中的煤粉不可太细也不可太粗。太细则煤粉在炉膛燃烧时间太短,无法维持炉膛  $1\ 300\sim 1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$  的温度;太粗则燃烧不完全,造成浪费。脱硫除尘装置包括除尘器和脱硫塔,其作用就是除去烟气中的粉尘和  $\text{SO}_2$ 。烟囱的作用就是排放烟气。现今火电厂的烟囱一般都在 200 m 以上,以此来达到使粉尘远飘的目的。

下面以某 2 100 t/h 亚临界参数自然循环固态排渣煤粉锅炉机组为例介绍锅炉的总体概况。

该锅炉本体采用单炉膛“ $\Pi$ ”型布置,一次中间再热,燃用煤粉,燃烧制粉系统为中速磨直吹、四角布置双切圆燃烧方式,并采用直流式宽调节比摆动式燃烧器,固态机械排渣,控制循环,喷水和燃烧器喷嘴摆动调节蒸汽温度,平衡通风,构架为全钢结构,露天岛式布置。

锅炉布置总图如图 1-2 所示。

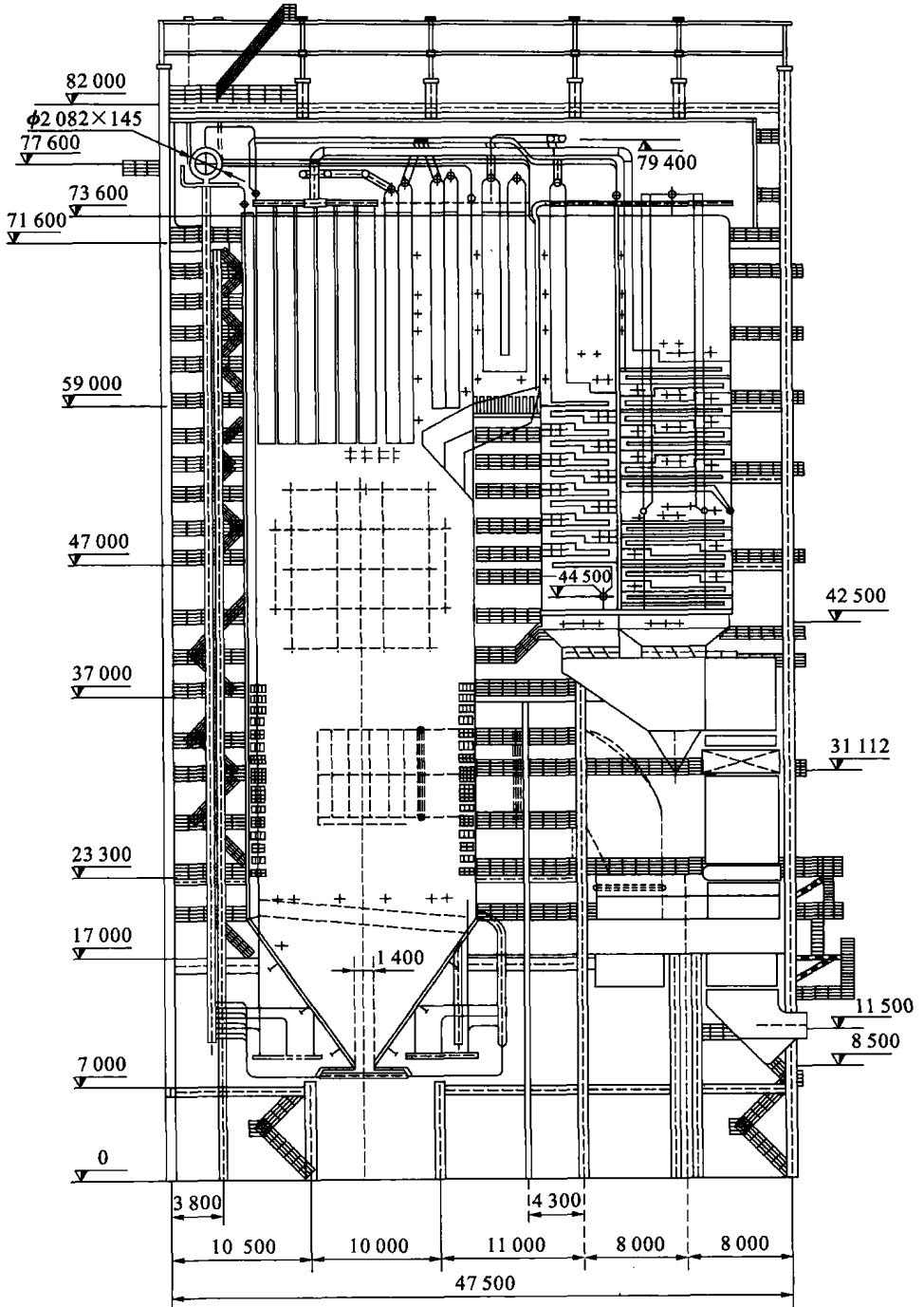


图 1-2 锅炉整体布置图

炉膛截面宽为 19.558 m, 深为 16.432 5 m, 其深宽比为 1 : 1.19。炉膛四周布置由内螺纹鳍片管构成的膜式水冷壁, 外径×壁厚为 51 mm×5.59 mm, 管间距为 63.5 mm, 共有 1 094 根管子。前、后墙底部水冷壁各自在标高 18.548 m 处向炉内延伸, 构成与水平面夹角为 50°的冷灰斗。后墙上部的水冷壁在标高 44.151 m 处向炉前延伸, 构成与水平面夹角为 55°的折焰角, 折焰角以上标高区域的前墙上布置墙式辐射再热器, 在此区域内, 自炉前到炉后方向分别布置了过热器分隔屏、屏式过热器和屏式再热器。一组低温过热器的墙式受热面作为包墙管(亦称包覆管)将炉顶和省煤器进口联箱标高以上尾部烟道(即后烟井)四壁包覆起来。炉墙均采用敷管炉墙形式。在炉前标高 67.055 m 处布置了汽包。封头呈半球形的汽包全长 28.91 m, 汽包筒身长 27.127 m, 内径为 1 778 mm, 采用不同壁厚(上壁厚为 196.1 mm, 下壁厚 163.9 mm), 材质为 SA-299, 汽包总重量为 281.23 t。汽包内部有 116 个轴向旋流式分离器及波纹板分离器作为汽水分离装置。6 根外径为 406 mm 的下降管沿下行方向从汽包引出, 并通过三台循环泵与外径为 914 mm 的环形水包连接。环形水包由前墙、后墙和左右侧墙四个水包构成, 其内部流道是互通的, 所有水冷壁管与环形水包相连。锅炉采用控制循环的汽水流动方式, 三台循环泵接于 6 根下降管的中部, 以增大循环的动力。在环形水包内, 每根水冷壁管进口端均装有节流圈, 用以控制水流量的分配。水冷壁的顶部与各自的上联箱连接, 汽水混合物汇集到上联箱, 然后通过引出管将汽水混合物引入汽包。

锅炉顶棚标高为 66.14 m, 炉膛高度为 56.995 m, 炉膛容积为 15 485 m<sup>3</sup>, 炉膛截面积为 321.37 m<sup>2</sup>。4 个直流摆动式燃烧器按切圆燃烧方式布置炉膛四角。燃烧器分 6 层, 每层燃烧的 4 个一次风(煤粉气流)喷口与同一台磨煤机连接供粉, 投则同投、停则同停。6 台磨煤机各自构成基本独立的 6 个制粉子系统, 并分别与 6 层燃烧器一次风喷嘴相对应, 5 层投运已能满足锅炉最大连续蒸发量(MCR)的需要。因此, 有一层燃烧器及其制粉子系统是备用的。各层燃烧器的一次风喷嘴、二次风(亦称辅助风)喷嘴及燃尽风喷嘴可以上下摆动, 用以调节蒸汽温度。

由 2 台轴流式一次风机和 2 台轴流式送风机、2 台离心式引风机和 2 台受热面转动再生式空气预热器为主体, 构成了两个基本独立的烟风系统。通过管路与挡板的交叉连接, 既可并列或单独运转, 也可完成各对应设备间的互换, 以降低锅炉低负荷时的厂用电和提高在设备发生故障时运行方式的灵活性。空气预热器是一、二次风流道相互分隔的三分仓再生式空气预热器, 可满足一、二次风的风压和风温不同的要求。在空气预热器与引风机之间串接静电除尘器, 使烟气含尘浓度达到排放标准。

沿烟气下行方向的锅炉尾部烟道(截面深×宽为 11 176 mm×19 558 mm)内, 依次布置低温对流过热器、省煤器和空气预热器。

从汽包产生的饱和蒸汽, 依次流经顶棚过热器、低温水平对流过热器、低温悬吊屏对流过热器、过热器分隔屏和屏式过热器, 最终使蒸汽温度达到额定蒸汽温度 540℃。由汽轮机高压缸排汽, 依次流经墙式辐射再热器、后屏式再热器和前屏式再

热器,最终使蒸汽再热温度达到额定值  $542.7^{\circ}\text{C}$ 。

锅炉所有承压受热面都通过自身的支吊、吊挂件由钢架支撑,膨胀方向向下。

除尘器、省煤器和炉膛冷灰斗下部的3组灰斗及磨煤机的石子煤排放口是锅炉的4组灰渣收集口,采用灰渣混除系统清除灰渣。

## 1.2 锅炉的参数及其主要特征指标

### 1.2.1 锅炉的参数

电站锅炉的参数主要包括锅炉容量、蒸汽参数及给水温度等。

#### 1. 锅炉容量

锅炉容量是用来表征蒸汽锅炉供热能力的指标。

大型电站锅炉的容量,即锅炉蒸发量,分为额定蒸发量和最大连续蒸发量两种,单位为  $\text{t/h}$ (或  $\text{kg/s}$ ),有时也用与配套汽轮发电机的出力相匹配的输出功率(MW)来表示锅炉的容量。

额定蒸发量(B-ECR)是指在额定蒸汽参数、额定给水温度下,使用设计燃料并保证热效率时所规定的锅炉蒸发量。

最大连续蒸发量(B-MCR)表示在额定蒸汽参数、额定给水温度下,使用设计燃料时,锅炉长期连续运行所能达到的最大蒸发量。最大连续蒸发量通常为额定蒸发量的1.03~1.2倍。

锅炉的设计蒸发量一般为最大连续蒸发量。

#### 2. 参数

电站锅炉参数是表征锅炉供热品位的标志,包括额定蒸汽参数及额定给水温度。前者是指锅炉过热器主汽阀出口处的额定过热蒸汽压力、温度;后者则为给水进入省煤器入口处的温度。对于中间再热锅炉,还应同时说明再热器进、出口锅炉的流量、压力和温度。

### 1.2.2 锅炉主要技术、经济、环保性指标

电站锅炉技术、经济、环保性指标包括锅炉效率、安全可靠性和钢材消耗量及环保性能等。

#### 1. 锅炉效率

由锅炉热平衡确定的锅炉热效率是指送入锅炉的全部热量被有效利用的百分比,用  $\eta_{el}(\%)$ 表示。它是衡量锅炉运行的经济性的主要指标。

为保证锅炉的正常运行,锅炉机组本身,如各种风机、泵、吹灰器及排污设备等还要消耗部分蒸汽及电力。从有效能量中减去这些自用能耗即可得到锅炉的净效率,用  $\eta_j(\%)$ 表示。

锅炉的燃烧效率  $\eta_r$  (%) 则反映燃料燃烧的完全程度, 取决于不完全热损失的大小, 即

$$\eta_{rl} = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 (\%) \quad (1-1)$$

$$\eta_l = (Q_1 - Q_{q_1} - Q_p) / Q_r (\%) \quad (1-2)$$

$$\eta_r = 1 - (q_3 + q_4) (\%) \quad (1-3)$$

式中:  $Q_1$  为锅炉有效利用热, kJ/kg;  $Q_r$  为锅炉在单位时间内所消耗的燃料的输入热量, kJ/kg;  $Q_{q_1}$  为锅炉机组自身所需的热量, kJ/kg;  $Q_p$  为锅炉机组自身电耗对应的热量, kJ/kg;  $q_3$ 、 $q_4$  分别为锅炉化学、机械不完全燃烧损失, %。

## 2. 钢材消耗量

锅炉钢材消耗量是衡量锅炉制造成本的重要指标, 其定义为: 锅炉单位蒸发量所用的钢材重量, 单位为: t · h/t。钢材消耗量与锅炉参数、循环方式、燃料种类及锅炉部件等因素有关。电站锅炉的钢材消耗量一般为 2.5 ~ 5 t · h/t。在保证锅炉安全高效运行的基础上, 应尽可能降低锅炉的钢耗率。设计锅炉时, 要协调这几个方面的要求, 以求得最佳方案。

## 3. 安全可靠

安全可靠生产始终是电力生产的首要任务。电厂锅炉不能发生任何人身及非人身重大事故, 如人员伤亡、承压容器和燃烧系统爆炸、停运, 燃烧系统的再燃等。不影响人身安全或不造成设备重大损伤的事故也应尽量减少。常用于锅炉工作可靠性分析的统计指标有

连续运行小时数 = 两次停炉(维修)之间的运行小时数

$$\text{事故率} = \frac{\text{事故停运小时数}}{\text{总运行小时数} + \text{事故停运小时数}} \times 100 \%$$

$$\text{可用率} = \frac{\text{运行总时数} + \text{备用时数}}{\text{统计期间总时数}} \times 100 \%$$

统计时间一般以一年作为一个周期, 连续运行小时数越多、事故率越低、可用率越高, 表示锅炉工作可靠性越高。电厂锅炉的连续运行小时数一般要求为 5 000 h 以上, 可用率超过 90 % ~ 95 %。

## 4. 环保性能

我国的燃煤电厂每年消耗的煤炭约占全国煤炭消耗量的 50 % ~ 60 %, 燃煤电厂是排放有害气体和粉尘的重要污染源。燃煤电厂排放的大气污染物主要有  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  及粉尘等。燃煤锅炉产生的这些污染物在排入大气之前, 必须经过严格的处理, 以减少煤燃烧后排放的有害污染物对大气的危害。

燃煤锅炉产生的粉尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ , 可分别通过高效除尘装置、脱硫设备、低  $\text{XO}_2$  燃烧技术或同时加装脱硝设备得到有效的脱除和控制。目前对燃煤产生的  $\text{CO}_2$  的排放还缺乏有效的控制手段。减少化石燃料的应用、提高化石燃料的能源效率, 是减少  $\text{CO}_2$  排放的主要方法;  $\text{CO}_2$  在燃烧后的封存和捕集技术也是目前学术界研究的

热点。有关这些污染物的排放指标,国家制定了严格的排放标准。根据2003年颁布的GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》,2004年1月1日起新建、扩建和改建的火电厂锅炉SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和烟尘的排放浓度,应不超过表1-1所规定的数值。

表1-1 国内外污染物排放标准对比数据

国家及地区	SO <sub>2</sub> /(mg/m <sup>3</sup> )	烟尘/(mg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>x</sub> /(mg/m <sup>3</sup> )
美国	184	20	135
欧盟	200	30	200
日本	200	50~100	200
中国(新标准)	200	30	200

## 1.3 锅炉分类

### 1.3.1 按容量分类

按照蒸发量的大小,锅炉有小型、中型和大型之分。但它们之间只有相对意义,没有固定的分界。以往的大型锅炉,现在只能列为中小型了。一般认为,蒸发量小于400 t/h的是小型锅炉,蒸发量为400~670 t/h的是中型锅炉,蒸发量大于670 t/h的是大型锅炉。按2002年我国电力行业标准《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》(DL/T 831—2002),容量达300 MW的锅炉才能列为大容量锅炉,但据有关信息,我国从2007年开始,在电网覆盖范围内新建的纯凝汽式发电厂中,不允许再采用单机容量小于(含)300 MW的机组了。

### 1.3.2 按蒸汽参数分类

按锅炉主蒸汽压力的高低,锅炉可分为低压( $p \leq 2.45$  MPa)、中压( $p = 2.94 \sim 4.92$  MPa)、高压( $p = 7.84 \sim 10.8$  MPa)、超高压( $p = 11.8 \sim 14.7$  MPa)、亚临界压力( $p = 15.7 \sim 19.6$  MPa)、超临界压力( $p > 22.1$  MPa)和超超临界压力等等级。对超临界压力锅炉和超超临界压力锅炉的分界点,目前还没有明确一致的说法。超临界压力锅炉的主蒸汽压力一般为 $p = 23 \sim 25$  MPa,我国目前文献上把 $p > 26$  MPa定为超超临界压力。

锅炉压力与机组容量一般有某种对应关系,主蒸汽压力等级提高要求机组容量相应有所增大。表1-2列出了我国电站锅炉的参数、相匹配容量和循环方式。表中没有列出高压以下等级的锅炉,因为这些锅炉煤耗率高,已经或正在进入淘汰之列。为了提高能源利用率,应该增加高效率大容量锅炉的比例。

表 1-2 我国电站锅炉的参数和容量

压力等级	主蒸汽压力 /MPa	蒸汽温度 (主/再)/°C	给水温度 /°C	蒸发量 /(t/h)	配套机组功率 /MW	循环方式
超高压	13.7	540/540	240	420	125(135)	自然循环
				670	200(210)	自然循环
亚临界	16.7~17.5	540/540	260	1 025	300(330)	自然循环
	17.5~18.3	540/540	278	2 008	600(650)	控制循环
超临界	25.4	543/569	289	1 950	600(650)	直流
	25.1	571/569	282	1 910	600(650)	直流
超超临界	26.25	603/605	296	2 950	1 000	直流

### 1.3.3 按燃烧方式分类

按燃料在锅炉中燃烧方式的不同,锅炉可分为层燃炉、室燃炉、旋风炉和流化床炉等,其示意图如图 1-3 所示。层燃炉具有炉排(或称炉箠),煤块或固体燃料主要在炉排上的燃料层内燃烧。所需空气由炉排下的风箱送入,穿过燃料层进行燃烧反

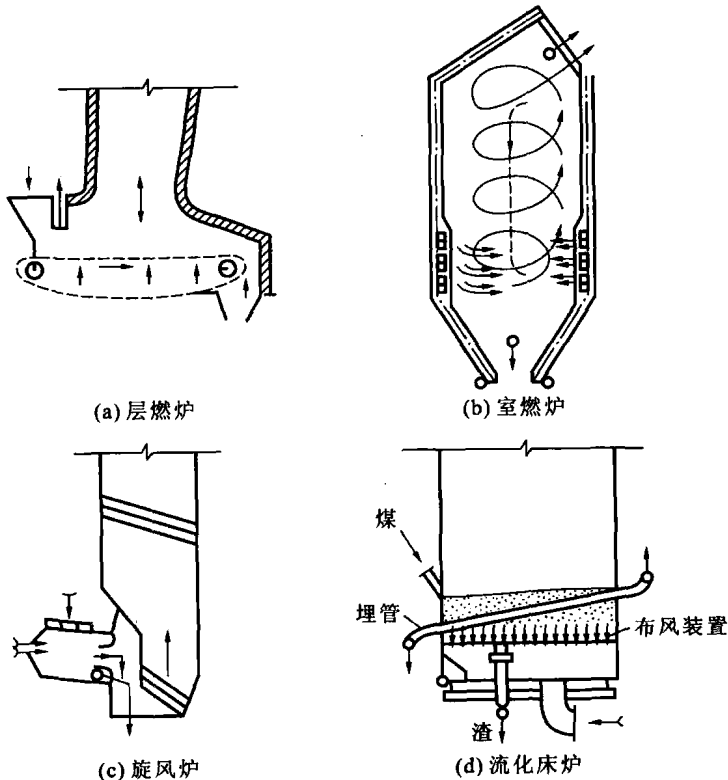


图 1-3 不同燃烧方式的锅炉

应。这类锅炉多为小容量、低参数的工业用炉。

室燃炉是目前电厂锅炉的主要类型,燃油炉、燃气炉及煤粉炉均属于室燃炉。在燃烧煤粉的室燃炉中,燃料是悬浮在炉膛空间内进行燃烧的。根据排渣方式的不同,室燃炉又可分为固态排渣炉和液态排渣炉。在我国电厂锅炉中,固态排渣室燃炉占有绝对的优势。

旋风炉是以一个圆柱形旋风筒作为燃烧室的炉子。气流在筒内高速旋转,较细的煤粉在旋风筒内悬浮燃烧,而较粗的煤粒则贴在筒壁上燃烧。筒内的高速旋转气流使燃烧加速,并使灰渣熔化形成液态排渣。旋风筒有立式和卧式两种布置形式,可燃用较粗的煤粉或煤屑。

流化床炉又称沸腾炉,炉子的底部为一多孔的布风板,空气以高速穿经孔眼,均匀进入布风板上的床料层中。床料层中的物料为炽热的固体颗粒和少量煤粒,当高速空气穿过时床料上下翻滚,形成“沸腾”状态。在沸腾过程中煤粒与空气有良好的接触混合,着火燃烧速度快、效率高,床内安置有以水和蒸汽(或空气)为冷却介质的埋管,使床料层温度控制在 $700\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。现代的流化床炉,为了提高燃烧效率减轻环境污染和对流受热面的磨损,在炉膛出口处将烟气中的大部分固体颗粒从气流中分离并收集起来,送回炉膛继续燃烧,称为循环流化床锅炉。沸腾炉可在常压下燃烧,也可在增压下燃烧。由增压沸腾炉出来的高温高压燃气,经除尘后可送入燃气轮机,而由埋管等受热面出来的蒸汽则送入蒸汽轮机,这样,就形成所谓燃气-蒸汽联合循环。

### 1.3.4 按水循环方式分类

按工质在蒸发受热面中流动的主要动力来源不同,一般可将锅炉分为自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉。这几种不同类型的锅炉中工质流动方式如图1-4所示。

自然循环锅炉蒸发受热面内工质、流动方式如图1-4(a)所示。蒸发设备由不受热的下降管4、受热的蒸发管6、联箱5和汽包3组成,它们连接成一个闭合的蒸发系统。给水经给水泵1流入省煤器2、受热后进入蒸发系统。当水在蒸发管中受热时,部分水变成蒸汽。故蒸发管内工质为汽水混合物,而不受热的下降管内工质为单相的水。由于水的密度大于汽水混合物的密度。故在联箱5的两侧存在压力差,借以推动工质在蒸发系统中循环流动。水在下降管中向下流动,汽水混合物在蒸发管中向上流动直至进入汽包。水和蒸汽在汽包内被分离,蒸汽由汽包上部引出经过过热器7过热,而分离出来的水与进入汽包的给水混合,流入下降管进行往复循环。这种循环流动是由于下降管与蒸发管内工质的密度差而产生的,故称为自然循环。单位时间内进入蒸发管的循环水量同生成汽量之比称为循环倍率。自然循环锅炉的循环倍率为 $4\sim 30$ 。亚临界压力以下的锅炉主要采用自然循环的方式。

控制循环锅炉蒸发受热面内工质、流动方式如图1-4(b)所示。从结构上看,控制循环锅炉和自然循环锅炉有许多相似之处,而二者的主要区别在于控制循环锅炉在



下降汇总管上设置了循环泵 8,以增强工质循环流动的推动力。控制循环锅炉的循环倍率在 3~10 之间,一般约为 4。

自然循环锅炉与控制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将锅炉的省煤器、蒸发设备、过热器分开,并使蒸发设备形成封闭的循环回路,蒸发受热面与过热器有固定的分界点。但汽包只适用于临界压力以下的工作压力。

直流锅炉蒸发面内工质流动方式如图 1-4(c)所示。直流锅炉没有汽包,工质一次流过蒸发受热面,全部转变为蒸汽,即循环倍率等于 1。另外,直流锅炉的省煤器、蒸发受热面和过热器之间没有固定的分界点。工质在蒸发受热面内流动的阻力是由给水泵提供压头来克服的。直流锅炉既可设计为临界压力以下,也可设计为超临界压力。

随着超临界压力锅炉的发展及炉膛热强度的提高,又发展了一种新的锅炉形式,即所谓复合循环锅炉。复合循环锅炉是由直流锅炉和控制循环锅炉发展而来的,是可同时采用直流和控制循环这两种循环方式的锅炉。复合循环锅炉的基本工作方式:锅炉在低负荷时蒸发受热面内工质有循环,即循环倍率大于 1;锅炉在高负荷时按直流方式工作,即工质一次通过蒸发受热面,循环倍率等于 1。

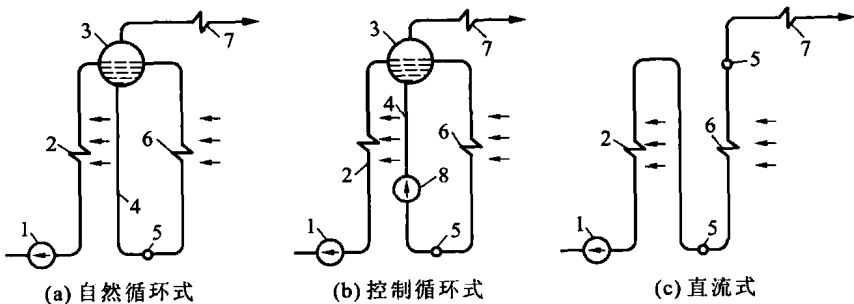


图 1-4 蒸发受热面内工质流动方式

- 1—给水泵;2—省煤器;3—汽包;4—下降管;5—联箱;
- 6—蒸发管;7—过热管;8—循环泵

## 1.4 国内外锅炉发展概况

### 1.4.1 我国电厂锅炉发展概况

解放前,我国没有电厂锅炉制造业,仅引进瑞士技术合作试制了两台与 2 000 kW 汽轮发电机组配套的蒸发量为 12 t/h 的锅炉。1949 年全国装机总容量仅 1.849 GW(其中火电装机容量为 1.686 GW),全国发电量约为  $4.3 \times 10^{10}$  kW·h。装机容量居世界第 21 位,发电量居世界第 25 位,人均年占有发电量仅 9.1 kW·h。

新中国成立以来,特别是改革开放以来,我国电力行业发展十分迅速,连续跨上两个台阶;1987 年发电容量达到 1 亿千瓦,1995 年又突破 2 亿千瓦。1988 年以来,