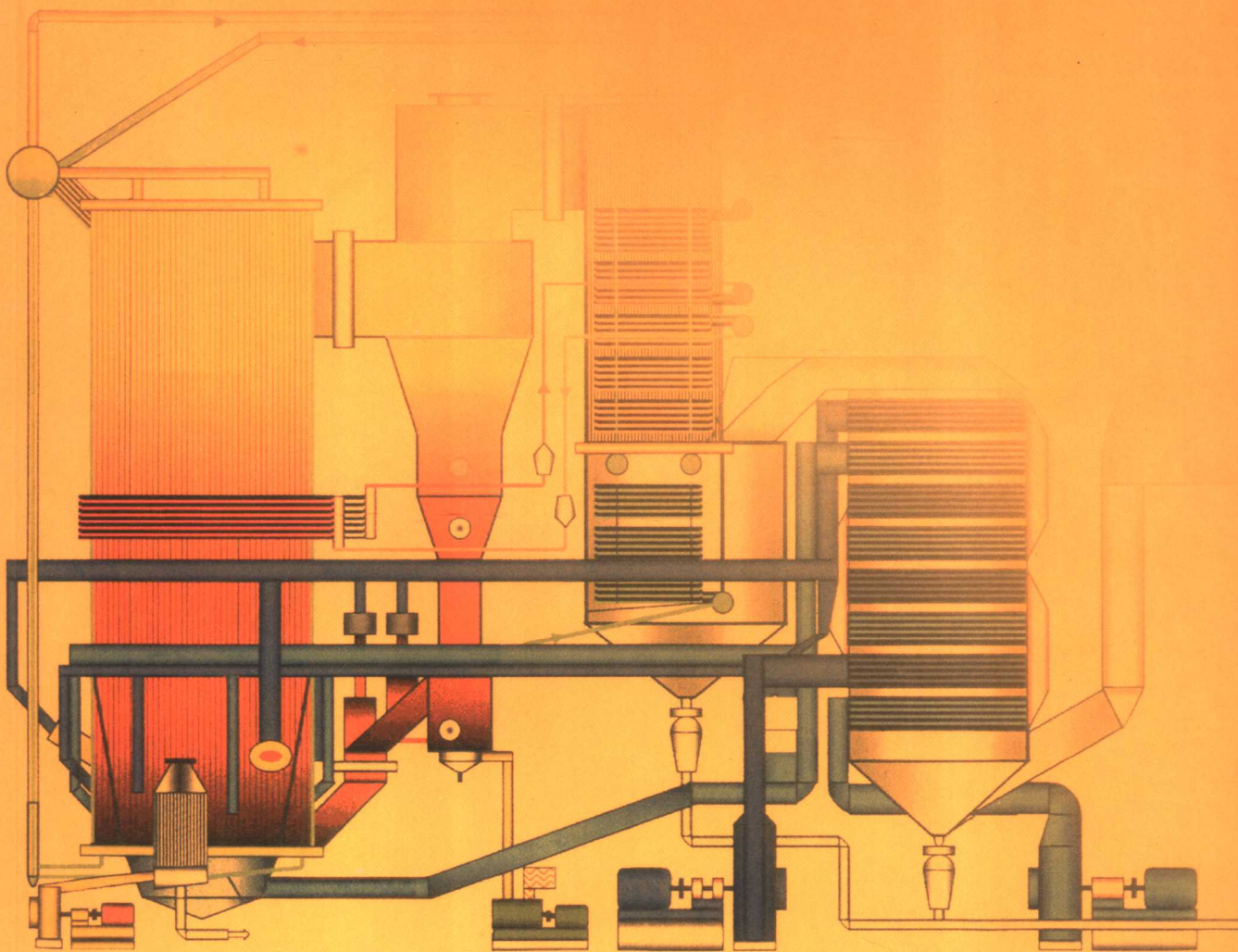




教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电厂锅炉

周菊华 操高城 郝 杰 合编



中国电力出版社

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



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电厂锅炉

周菊华 操高城 郝 杰 合编
容奎恩 樊泉桂 主审

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书结合火力发电厂 300MW 以上机组的锅炉设备、系统和技术特点编写。

本书密切结合专业教学和职工培训要求,以大型煤粉锅炉为主干,全面系统地阐述了电厂锅炉的主要设备及工作原理。主要内容包括:电厂锅炉概述,锅炉机组及其工作原理,燃料特性及燃烧计算,锅炉机组热平衡,制粉系统、设备及运行,燃烧基本理论,燃烧设备,新型燃烧器及煤粉燃烧技术,蒸发设备及水循环特性,亚临界及超临界参数的强制流动锅炉,以及蒸汽净化和蒸汽品质控制,锅炉给水处理,过热器和再热器系统,汽温调节,省煤器和空气预热器系统,受热面磨损、积灰、腐蚀和空气预热器的漏风及密封技术,锅炉吹灰、除尘除渣设备、系统及运行等。

本书可作为电力高等职业技术学院电厂热能动力装置和电厂集控运行专业的教材,也可作为电力行业职业技能鉴定的培训教材,同时可供从事电厂锅炉运行、检修和管理工作的工程技术人员参考

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂锅炉/周菊华,操高城,郝杰合编. —北京:中国电力出版社, 2005

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-2072-7

I. 电... II. ①周... ②操... ③郝... III. 火电厂 - 锅炉 - 高等学校:技术学校 - 教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 135950 号

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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 3 月第一版 2006 年 7 月北京第三次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 23 印张 507 千字

印数: 6001—9000 册 定价 29.90 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书共分十章，内容密切结合电厂热动力装置专业、火电厂集控运行专业和电厂运行人员及相关专业的职工培训和鉴定的教学要求，全面系统阐述了锅炉的工作原理；锅炉设备结构、工作原理；有关辅助设备和系统等。按照我国电力工业发展趋势，在取材方面，尽量反映我国大型电站的现状、特点，同时又注意吸收国外的先进经验和技术。

本书由武汉电力职业技术学院副教授周菊华、太原电力职业技术学院副教授操高城和保定电力职业技术学院副教授郝杰编写，其中周菊华编写第一章、第四章、第五章、第十章及前言等；操高城编写第七章、第八章和第九章；郝杰编写第二章、第三章和第六章。全书由周菊华统稿。

本书由华中科技大学教授容銓恩主审，容銓恩教授详细审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的意见和建议，详细而具体，使编者在修改过程中受益非浅，特此向容銓恩教授表示深切的谢意。

本书在讨论编写大纲过程中，得到东北电力大学樊泉桂教授的帮助和支持，在此，编者对樊泉桂教授以及所有关心和支持本书出版的专家、学者表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，恳切希望使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编者

2004年12月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 电厂锅炉的工作过程	1
第二节 电厂锅炉的特征和分类	4
第三节 锅炉的安全和经济指标	12
第四节 电厂锅炉的发展概况	14
第五节 锅炉受压元件用钢	17
复习思考题	18
第二章 燃料及燃料的燃烧计算	19
第一节 燃料及其特性	19
第二节 燃烧反应和空气量计算	33
第三节 烟气容积和过量空气系数	35
复习思考题	47
第三章 锅炉机组热平衡	48
第一节 锅炉热平衡	48
第二节 锅炉的输入热量及有效利用热量	49
第三节 锅炉各项热损失	51
第四节 锅炉净效率及燃料消耗量	58
第五节 锅炉热平衡试验方法	59
复习思考题	62
第四章 煤粉制备	63
第一节 煤粉的性质	63
第二节 磨煤机	68
第三节 制粉系统及主要辅助设备	82
第四节 制粉系统的运行调节	92
复习思考题	96
第五章 燃烧基本原理及燃烧设备	98
第一节 燃料燃烧的基本原理	98
第二节 煤粉气流的燃烧过程	104
第三节 燃烧器和煤粉燃烧新技术	111
第四节 煤粉锅炉的炉膛及布置	134
第五节 锅炉风烟系统	142
复习思考题	144
第六章 蒸发设备及循环原理	146
第一节 蒸发设备	146

第二节	自然循环原理	153
第三节	自然循环常见故障	162
第四节	强制流动锅炉	167
复习思考题		174
第七章	蒸汽净化	175
第一节	蒸汽污染	175
第二节	提高蒸汽品质的途径	182
第三节	典型汽包内部装置示例	199
复习思考题		203
第八章	过热器、再热器及减温设备	205
第一节	过热器、再热器的结构及汽温特性	205
第二节	热偏差	218
第三节	汽温调节和过热器、再热器系统	223
第四节	过热器、再热器的高温积灰与高温腐蚀	240
复习思考题		244
第九章	省煤器和空气预热器	245
第一节	省煤器	245
第二节	空气预热器	250
第三节	尾部受热面积灰、磨损和低温腐蚀	262
第四节	锅炉整体布置	270
复习思考题		282
第十章	吹灰、除尘、除灰设备及系统	283
第一节	吹灰系统及设备	283
第二节	锅炉受热面的吹灰	287
第三节	除尘设备	289
第四节	电除尘器的运行	298
第四节	锅炉除灰除渣系统	301
复习思考题		323
参考文献		324

绪 论

第一节 电厂锅炉的工作过程

一、电厂锅炉的工作过程

电能是实现工业、农业、交通运输和国防现代化的主要动力，是国民经济发展的基础，是社会文明进步的标志。发电厂是生产电能的工厂。根据生产电能的能源不同，主要有火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。此外，还有少量的风能、太阳能和潮汐发电厂等。而火力发电厂是目前世界大多数国家包括我国在内的电能生产的主力。

火力发电是利用煤、石油或天然气等燃料的化学能来生产电能的。其生产过程如图 1-1 所示。燃料送入锅炉 1 中燃烧，放出热量将给水加热蒸发并形成饱和蒸汽，饱和蒸汽进一步加热后成为具有一定温度和压力的过热蒸汽，过热蒸汽通过蒸汽管道进入汽轮机 2 膨胀做功，高速汽流推动汽轮机转子并带动发电机 3 的转子一起旋转发电。蒸汽在汽轮机中做完功以后排入凝汽器 4，并在凝汽器中被循环水泵 11 提供的冷却水冷凝成为凝结水，凝结水经凝结水泵 5 升压后打入低压加热器 6，利用汽轮机的抽汽将其加热后送入除氧器 7 中加热并除氧，除氧后的凝结水连同补给水由给水泵 8 升压，经高压加热器 9 进一步提高温度后送回锅炉。火力发电厂的生产过程就是不断重复上述循环的过程。汽水系统中的蒸汽和水总会有一些损失，故需要不断向系统补充经过化学处理的软化水。补充水通常是送入除氧器（或凝汽器）中。

由此可以看出，在火力发电厂的生产过程中存在着三种形式的能量转换：在锅炉中燃料的化学能转变为热能；在汽轮机中热能转变为机械能；在发电机中机械能转变为电能。锅炉、汽轮机和发电机称为火力发电厂的三大主机。

锅炉是火力发电厂三大主机中最基本的能量转换设备。其作用是利用燃料在炉内燃烧释放的热能加热给水，产生规定参数（温度、压力）和品质的蒸汽，送往汽轮机做功。根据我国的燃料政策，锅炉的燃料主要是煤。将煤磨制成煤粉，然后送入锅炉炉膛中燃烧，这种锅炉便是煤粉炉。

二、电厂锅炉的组成部件及作用

图 1-2 是一台煤粉炉及其辅助系统示意图，可以用来说明锅炉的主要构成和工作过程。

1. 燃烧系统

运输到火电厂的原煤，经过初步破碎和除铁、除木屑后，送到原煤斗 1，从原煤斗靠自重落下的煤，经过给煤机 2 送入磨煤机 3 中磨制成合格的煤粉，同时外界冷空气经一次风机升压后送入锅炉的空气预热器 15，冷空气在空气预热器内被烟气加热后直接进入磨煤机，用于对原煤加

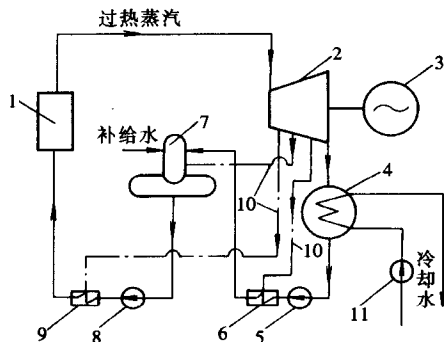


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

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—汽轮机抽汽管道；11—循环水泵

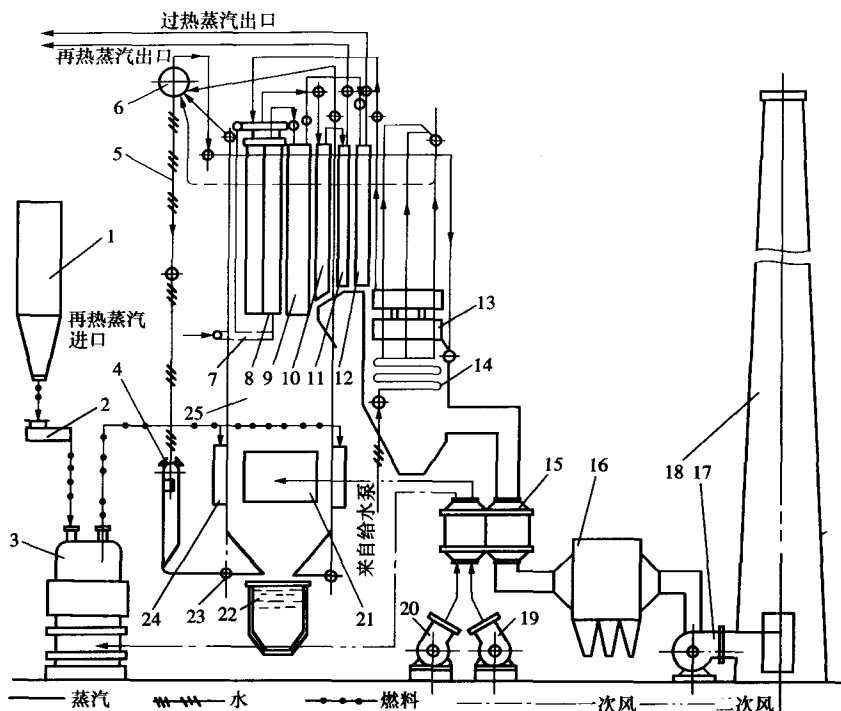


图 1-2 电厂锅炉机组构成及生产过程示意简图

1—原煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—循环泵；5—下降管；6—汽包；7—墙式再热器；8—分隔屏；9—后屏；10—屏式再热器；11—高温再热器；12—高温过热器；13—低温过热器；14—省煤器；15—空气预热器；16—电除尘器；17—引风机；18—烟囱；19—二次风机；20—一次风机；21—大风箱；22—除渣装置；23—下水包；24—燃烧器；25—炉膛

热、干燥，以便磨制，同时热空气本身也是输送煤粉的介质，它将磨好的煤粉输送到燃烧器进入炉膛。这股携带煤粉的热空气称为一次风。

外界冷空气经二次风机（送风机）升压后送入锅炉的空气预热器，冷空气在空气预热器内被烟气加热后，通过燃烧器二次风喷口直接进入炉膛，在炉膛内与已着火的煤粉气流混合，并参与燃烧反应，同时还起扰动和强化燃烧的作用，这股热空气称为二次风。

煤粉和空气进入炉膛后，在炉膛内悬浮燃烧放出热量，在燃烧火焰中心具有 1500°C 或更高的温度。炉膛周围布置着大量水冷壁管，炉膛上部布置着顶棚过热器及屏式过热器等受热面。高温火焰和烟气在炉膛内向上流动时，主要以辐射换热方式把热量传递给水冷壁和过热器管内的水和汽。烟气的温度也不断地降低。

高温烟气离开炉膛进入水平烟道和垂直烟道，而在水平烟道和垂直烟道中布置有高温再热器 11、高温过热器 12、低温过热器 13、省煤器 14、空气预热器 15 等受热面。烟气在流过这些受热面时主要以对流换热的方式放出热量，因此这些受热面称为对流受热面。过热器和再热器布置在烟气温度较高的区域，称为高温受热面。而省煤器和空气预热器布置在烟气温度较低的尾部烟道内，故称为低温受热面或尾部受热面。

烟气流经一系列对流受热面时，不断放出热量而逐渐冷却下来，离开空气预热器的烟气（即锅炉排烟）温度已相当低，通常在 $110 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 之间。由于煤中灰分不参与燃烧过程，烟

气在炉膛向上流动时，其中较大的灰粒会因自重从气流中分离出来，沉降至炉膛底部的冷灰斗中，形成固态渣，最后由除渣装置 22 排出，大量的细小灰粒则随烟气流动，为了防止环境污染，锅炉排烟首先要经过除尘器 16，将烟气中大部分灰粒捕捉下来，最后比较清洁的烟气由引风机 17 通过烟囱 18 排至大气。

以上与燃料燃烧有关的煤、风、烟气系统称为锅炉的燃烧系统。锅炉的“炉”即泛指燃烧系统。它的主要任务是使燃料在炉内良好燃烧，放出热量。燃烧系统由燃烧设备（炉膛、燃烧器和点火装置）、空气预热器、通风设备（风机）及烟、风管道等组成。如图 1-3 所示。

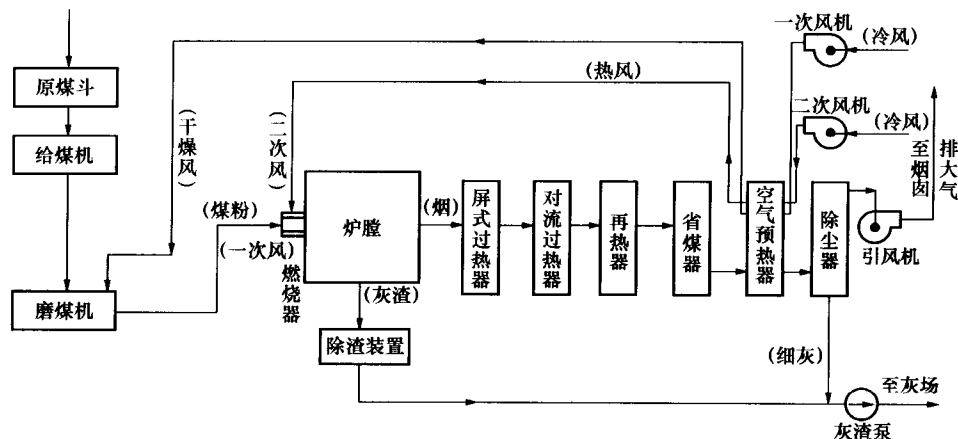


图 1-3 锅炉燃烧系统流程

2. 汽水系统

如图 1-4 所示，锅炉给水首先进入省煤器，在省煤器中自下而上流动，被从上而下流动的烟气加热。受热后送至汽包，进入由汽包、下降管、联箱、水冷壁构成的自然循环蒸发回路中。汽包中的水沿下降管至下联箱，再进入水冷壁内，因吸收炉内火焰和烟气的辐射热，进一步加热升温成饱和水，并使部分水变成饱和蒸汽，此时水冷壁管子中的工质是汽水混合物。汽水混合物向上又流入汽包，在汽包内通过汽水分离装置进行汽和水的分离，分离出来的水留在汽包下部，连同不断进入汽包的给水一起又下降，随后在水冷壁吸热而又上升，周而复始，形成自然循环。这种锅炉就是自然循环锅炉。汽包中分离出来的饱和蒸汽，从汽包顶部引出，进入各级过热器加热达到规定过热汽温后经主蒸汽管道送往汽轮机高压缸做功。

为了提高锅炉—汽轮机组的循环热效率和安全性，锅炉压力在 13.7MPa 以上时大多数采用再热循环。这样锅炉汽水系统中还有再热器。过热蒸汽在汽轮机高压缸膨胀做功后，又被送回锅炉再热器中。再热器的任务是将汽轮机高压缸膨胀做功、温度和压力都降低了的排汽，进一步加热升温，然后送往汽轮机中、低压缸继续膨胀做功。

以上与汽水有关的受热面和管道系统称为锅炉的汽水系统。锅炉的“锅”即泛指汽水系统。如图 1-4 所示。它的主要任务是有效吸收燃料燃烧放出的热量，将水加热成过热蒸汽。对自然循环锅炉，锅炉汽水系统主要由省煤器、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、联箱及连接管道等组成。

现代电站锅炉对给水和蒸汽的品质都有较高的要求。当给水含有杂质时，在锅炉内，锅水的杂质浓度会随锅水的不断汽化而升高。这些杂质会在锅炉的受热面上结成水垢，使传热

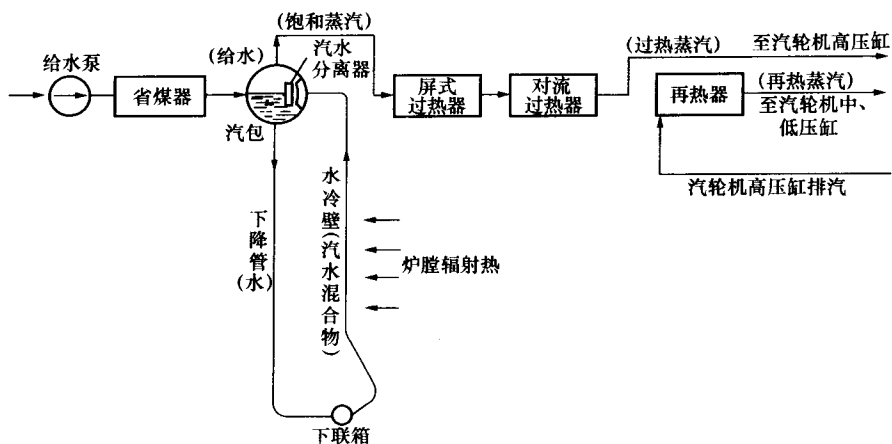


图 1-4 锅炉汽水系统流程

恶化，严重时会使受热面管子过热烧坏。这些杂质也会溶解在蒸汽中，携带杂质的蒸汽进入汽轮机做功时，杂质也会沉积在汽轮机的通流部分，影响汽轮机的出力、效率和运行的安全性。因此，进入锅炉的给水必须预先处理，运行时还要严格监视水和蒸汽的品质。

电厂锅炉机组是由锅炉本体、辅助系统和附属设备、锅炉附件等构成的。锅炉本体主要包括“锅”和“炉”，此外，锅炉本体还包括用来构成封闭的炉膛和烟道的炉墙和用来支撑和悬吊汽包、受热面、炉墙等设备的构架（包括平台扶梯）。

现代电站锅炉机组的辅助系统和附属设备较多。辅助系统包括：燃料供应系统、煤粉制备系统、给水系统、通风系统、除尘除灰系统、水处理系统、测量及控制系统等。各个辅助系统都配有相应的附属设备和仪器仪表。

为了保证锅炉生产过程的正常进行，还必须设置若干锅炉附件，锅炉附件包括安全门、水位计、吹灰器、热工仪表等。安全门用来控制锅炉蒸汽压力，以确保锅炉和汽轮机运行安全。水位计用来监视汽包水位。吹灰器用来清除锅炉受热面上的积灰，以保持受热面清洁。热工仪表用来监视锅炉热工参数。

第二节 电厂锅炉的特征和分类

一、锅炉容量与参数

锅炉容量即锅炉蒸发量，它是反映锅炉生产能力大小的基本特性数据。常用符号 D 表示，单位为 t/h 。习惯上，电厂锅炉容量也用与之配套的汽轮发电机组的电功率来表示，如 300MW。

在大型锅炉中，锅炉容量又分为额定蒸发量和最大连续蒸发量。

蒸汽锅炉的额定蒸发量（BECR）是指在额定蒸汽参数、额定给水温度、使用设计燃料并保证热效率时所规定的蒸汽量。

蒸汽锅炉的最大连续蒸汽量（BMCR）是指在额定蒸汽参数、额定给水温度、使用设计燃料，长期连续运行时所能达到的最大蒸汽量。一般 $BMCR = (1.03 \sim 1.2) BECR$ 。

锅炉蒸汽参数是说明锅炉蒸汽规范的特性数据，一般指锅炉过热器出口处的蒸汽温度和

蒸汽压力(表压力),分别用符号 P 、 t 表示,单位分别为 MPa、 $^{\circ}\text{C}$ 。锅炉设计时所规定的蒸汽压力和温度称为额定蒸汽压力和额定蒸汽温度。对于具有再热器的锅炉,蒸汽参数还应包括再热蒸汽压力、再热蒸汽温度和再热蒸汽流量。

额定蒸汽压力是指蒸汽锅炉在规定的给水压力和负荷范围内,长期连续运行时应予保证的蒸汽压力,单位是 MPa。

额定蒸汽温度是指蒸汽锅炉在规定的负荷范围、额定蒸汽压力和额定给水温度下长期连续运行所必须保证的出口蒸汽温度,单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

20 世纪 70 年代以前,我国的火电机组单机容量在 100 MW 以下,蒸汽参数以 10 MPa/540 $^{\circ}\text{C}$ 为主;80 年代初期,自行设计和制造了单机容量为 200 MW 的火电机组,配置主蒸汽参数为超高压,并具有中间再热系统的 14 MPa/540 $^{\circ}\text{C}$ /540 $^{\circ}\text{C}$ 的锅炉机组。

80 年代以后,我国的火电机组以引进技术国产化为主,建设了一批亚临界与超临界参数大容量发电机组。各种技术类型的 300、500、600、800MW 级亚临界与超临界参数的锅炉机组相继投入运行。表 1-1~表 1-3 是中国电站锅炉的蒸汽参数及容量系列。

表 1-1 我国电站锅炉的蒸汽参数及容量

蒸汽压力 (MPa)	过热/再热蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	MCR ^① (t/h)	汽轮发电机功率 (MW)
9.9	540	205~225	220, 410	50, 100
13.8	555/555	220~250	420, 670	125, 200
16.8~18.3	540/540	250~280	1025~2008	300, 600
17.5	540/540	255	1025~1650	300, 500
25.4	541/566	286	1900	600
25.0	545/545	267~277	1650~2650	500, 800

① 为锅炉最大连续蒸发量。

表 1-2 亚临界压力自然循环及控制循环锅炉的容量及参数

机组功率 (MW)	300	300	300	600	600
循环方式	自然循环	控制循环	自然循环	自然循环	控制循环
过热蒸汽流量 MCR (t/h)	1025	1025	1025	2026.8	2008
再热蒸汽流量 (t/h)	860	834.8	823.8	1704.2	1634
过热蒸汽压力 (MPa)	18.2	18.3	18.3	18.19	18.22
再热蒸汽压力 (MPa)	4.00/3.79	3.83/3.62	3.82/3.66	4.176/4.3	3.49/3.31
过热蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	540	541	540	540.6	540.6
再热蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	330/540	322/541	316/540	313.0/540.6	313.3/540.6
给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	276	281	278	276	278.33
燃煤量 (t/h)	136.61	139.89	122.6	264.4	269.9
燃烧方式	四角燃烧	四角燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	四角燃烧

表 1-3 超临界压力直流锅炉及低倍率循环锅炉的容量及参数

机组功率 (MW)	600	500	800	500
过热蒸汽流量 MCR (t/h)	1900	1650	2650	1650
再热蒸汽流量 (t/h)	1613	1481	2151.5	1481
过热蒸汽压力 (MPa)	25.4	25.0	25.0	17.46
再热蒸汽压力 (MPa)	4.77/4.57	4.15/3.9	3.86/3.62	4.12/4.0
过热蒸汽温度 (℃)	541	545	545	540
再热蒸汽温度 (℃)	338/566	295/545	283/545	333/540
给水温度 (℃)	286	270	277	255
燃煤量 (t/h)		208	336.5	
燃烧方式	四角燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧
水冷壁型式	螺旋管圈	垂直管屏	垂直管屏	垂直管屏

注 1. 蒸汽压力的数值为表压。
2. 以分数形式表示的蒸汽温度，分子为过热蒸汽，分母为再热蒸汽。

表 1-4 国外超临界参数机组的发展方向

主蒸汽压力 (bar)	290	305	335	400
主蒸汽温度 (℃)	582	582	610	700
再热蒸汽压力 (bar)	80	74	93	112
再热蒸汽温度 (℃)	580	600	630	720
循环热效率 (%)	47	49	> 50	52 ~ 55

注 1 bar = 0.1 MPa。

二、锅炉的分类和型号

(一) 锅炉分类

锅炉的分类方法很多，主要有以下几种。

1. 按锅炉容量分类

按锅炉容量的大小，锅炉有大型、中型、小型之分，但它们之间没有固定、明确的分界。随着我国电力工业的发展，电厂锅炉容量不断增大，大中小型锅炉的分界容量便不断演变，从当前情况来看，发电功率等于或大于 300MW 机组配置的锅炉为大型锅炉。

2. 按锅炉的蒸汽压力分类

按锅炉出口蒸汽压力（表压） p ，可将锅炉分为低压锅炉（ $p \leq 2.45$ MPa）、中压锅炉（ $p = 2.94 \sim 4.92$ MPa）、高压锅炉（ $p = 7.84 \sim 10.8$ MPa）、超高压锅炉（ $p = 11.8 \sim 14.7$ MPa）、亚临界锅炉（ $p = 15.7 \sim 19.6$ MPa）、超临界锅炉（ $p \geq 22.1$ MPa）。

低压锅炉主要用于工业锅炉，而发电功率等于或大于 300MW 的锅炉都采用亚临界压力和超临界压力的锅炉。我国 300MW 火力发电机组的锅炉绝大多数采用亚临界参数（ $p = 15.7 \sim 19.6$ MPa），只有少数采用超临界参数（ $p \geq 22.1$ MPa）。亚临界压力锅炉都采用中间过热，即都装设有再热器。

3. 按炉内燃烧过程的气体动力学原理分类

按炉内燃烧过程的气体动力学原理，锅炉有四种不同的燃烧方式，对应于四种不同的锅

炉。

(1) 火床燃烧方式和火床炉。固体燃料以一定厚度分布在炉排上进行燃烧的方式称为火床燃烧方式，用火床燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为火床炉。火床炉的工作特点是：有一个固定的或可移动的炉排，将块状的固体燃料送入炉内，在炉排上形成固体燃料层，空气从炉排下的通风孔隙穿过燃料层向上流动，在高温下，空气和燃料发生燃烧反应，大部分燃料在炉排上形成火床燃烧，只有少数细小颗粒的固体燃料和燃烧生成的可燃气在火床上的炉膛空间燃烧。燃料在炉排上燃烧生成的高温烟气也离开燃料层向上流动，升入炉膛。火床炉有链条炉、推动炉排炉、双层炉排炉、人工炉等多种型式。其中链条炉是结构较完善、热效率较高、机械化程度较高的火床炉，其结构示意图见图 1-5。但链条炉因其炉排结构复杂，体积庞大，金属消耗较大，且其热效率不及煤粉炉高，不适应大容量锅炉发展的需要，故只用于 1~65 t/h 的小容量、低参数工业锅炉中。

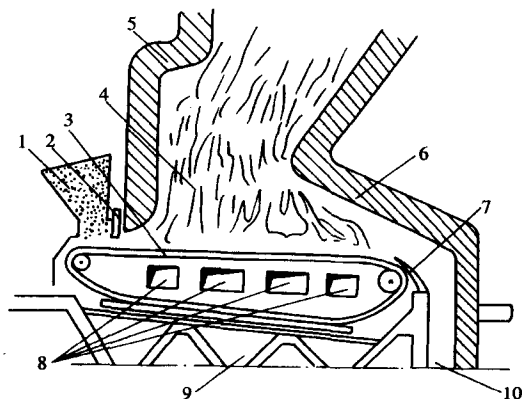


图 1-5 链条炉结构示意图

1—煤斗；2—煤闸门；3—链条炉排；4—炉膛；5—前拱；6—后拱；7—除渣板（俗称老鹰铁）；8—风室；9—灰斗；10—灰渣口

(2) 火室燃烧方式和室燃炉。燃料以粉状、雾状或气态随同空气喷入炉膛中进行燃烧的方式称为火室燃烧方式，用火室燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为室燃炉。其气体动力学特点是：粉状、雾状或气态的燃料颗粒随同空气—烟气流作连续的运动，燃料颗粒悬浮在空气—烟气流中，连

续流过炉子空间，并在悬浮状态下着火、燃烧，直至燃尽。所以火室燃烧方式也叫悬浮燃烧方式。煤粉炉、燃油锅炉和燃气锅炉都属于室燃炉。特别是煤粉锅炉，它是现代大中型电站锅炉的主要形式，其结构示意可参见图 1-2。

(3) 旋风燃烧方式和旋风炉。燃料和空气在高温的旋风筒内高速旋转，细小的燃料颗粒在旋风筒内悬浮燃烧，而较粗的燃料颗粒被甩向筒壁液态渣膜上进行燃烧的方式称为旋风燃烧方式，用旋风燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为旋风炉。旋风炉有立式和卧式两种。图 1-6 示出三种旋风炉的结构示意图。美国常用卧式旋风炉，我国及前苏联则多采用 BTI 立式旋风炉，德国则采用 KSG 立式旋风炉。筒内的高温 and 高速旋转气流使燃烧加速，并使灰渣熔化形成液态排渣。由于旋风炉的负荷调节范围较小，而且不能快速启动和停炉，炉温也较高， NO_x 的排放量较煤粉炉大，故在我国电厂中很少使用。

(4) 流化床燃烧方式和流化床锅炉。流化床燃烧方式的气体动力学基础是固体物料的流态化。所谓固体物料的流态化是指固体颗粒在与流动着的流体混合后，能像流体那样自由流动的现象。流化床燃烧方式就是燃料颗粒在大于临界风速（由固定床转化为流化床的风速）的空气流速作用下，在流化床上呈流化状态的燃烧方式。采用流化床燃烧方式锅炉称为流化床锅炉。流化床燃烧是 20 世纪 60 年代发展起来的新型燃烧技术，40 多年来发展很快，应用范围已从中、小型的工业锅炉发展到较大型的电站锅炉；流化床燃烧技术本身也由第一代的鼓泡流化床发展到第二代的循环流化床。图 1-7 所示是一台小型鼓泡流化床锅炉的结构示

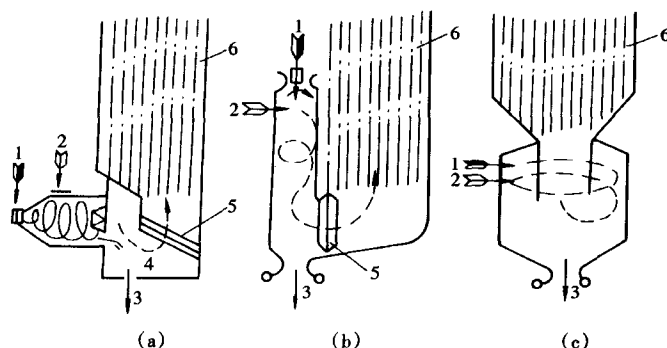


图 1-6 旋风炉的结构示意图

(a) 卧式旋风锅炉; (b) ВТИ 立式旋风锅炉; (c) KSC 立式旋风炉

1—燃料; 2—二次风; 3—液态渣; 4—燃尽室; 5—捕渣管束; 6—冷却室

意图, 碾碎成细小颗粒的燃料从前墙用给煤机通过给煤口送入床内, 床内布置有倾斜 (或垂直) 的埋管蒸发受热面, 空气由风室通过床下的布风板送入床层, 将燃料颗粒吹起。吹起的燃料颗粒上升到一定高度, 在重力作用下又会落下, 再由空气吹起, 然后又落下, 如此反复上升、落下, 好像水在沸腾时的状态一样, 固体颗粒层也沸腾起来, 此时固体颗粒 (又称床料) 便进入流化状态, 因此流化床锅炉又称沸腾锅炉。

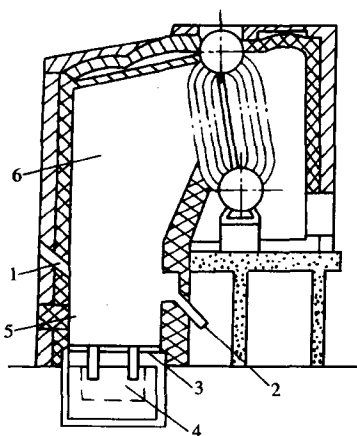


图 1-7 鼓泡流化床锅炉的结构示意图

1—给煤口; 2—溢流口; 3—布风板;

4—风室; 5—沸腾段; 6—悬浮段

流化床燃烧有许多优点: 燃料适应性广, 能燃劣质煤; 在燃烧过程中能有效控制有害气体 NO_x 、 SO_2 产生和排放; 燃烧热强度大, 能缩小炉膛容积; 床内传热能力强, 节省受热面金属消耗; 负荷调节性能好, 且调节范围大; 灰渣可以综合利用等。但由于这是一种新发展的燃烧技术, 第一代的鼓泡流化床还存在燃烧效率低, 床内埋管受热面易磨损, 截面热负荷低而不利于向大型发展, 用石灰石脱硫效率较低等缺点。为发挥流化床锅炉的优势, 解决鼓泡流化床存在的问题, 近年来又发展了第二代的循环流化床燃烧技术。循环流化床与鼓泡流化床的差异在于加大了空气流速 (或称流化速度)。鼓泡流化床的空气速度只要略大于临界风速便可, 若加大流化速度, 达到使床内全部固体颗粒都被吹出炉膛时的极限速度 (称为输送速度), 此时炉膛内的气固两相流动工况则转变为输送床 (又称浓相输送)。如果在炉膛

出口处安装一个高效率的分离器, 将气流中的固体颗粒分离出来, 再用固体燃料回送装置送至炉膛底部, 继续在床内燃烧, 并维持炉内流化床料总量不变的连续工作状态, 这就是循环流化床。

循环流化床的流化速度约为鼓泡流化床的 2~3 倍, 循环流化床内不再有鼓泡流化床那样清晰的分界面, 固体颗粒充满整个炉膛, 处于悬浮并强烈掺混的燃烧方式。与常规煤粉炉中发生的单纯悬浮燃烧过程比较, 颗粒在循环流化床燃烧室的浓度远大于煤粉炉, 并且有强

烈的物料返混、颗粒的外循环和横向混合特征，而且使得整个炉内温度均匀，有利于延长燃烧和脱硫时间；物料通过分离器多次循环回到炉内，大大延长了燃料颗粒在炉内的停留和反应时间，燃烧效率可达 97%~99%，脱硫效率可达 90%，同时也能有效抑制 NO_x 的生成。另外，由于循环流化床的截面热负荷比鼓泡流化床大得多，有可能实现锅炉大型化。

循环流化床锅炉性能在很多方面都可与煤粉炉相比美，在减少污染方面还优于煤粉炉，所以循环流化床锅炉出现以后，立刻受到国内外的高度重视，并得到迅速发展。世界上第一台发电功率为 250MW 中间过热的循环流化床锅炉已于 1995 年在法国电力公司普罗旺斯电站投入运行。各国正在生产和设计 110~500MW 发电容量的大型电站锅炉，循环流化床锅炉可望成为新一代高效率、低污染的电站燃煤锅炉机组。特别在我国，电站锅炉以燃煤为主，而且主要是劣质煤，燃煤量的增大将使煤燃烧引起的环境污染问题更加严重，因而对污染物的排放限制将更加严格，这将促使循环流化床锅炉在我国的发展和应用。近年来，我国大容量的循环流化床燃煤电站锅炉迅速发展，单机最大容量的循环流化床锅炉发电技术已接近 300MW，将在我国洁净煤发电领域处于优先发展的地位。

图 1-8 为芬兰奥斯龙 (Ahlstrom) 公司生产的 Pyroflow 型循环流化床锅炉的结构示意图。该锅炉的发电功率为 110MW，炉膛四周敷设了水冷壁，炉膛上部布置有屏式过热器，从炉膛出来带有大量固体床料的热烟气进入分离器，由分离器分离出来的热灰（含未完全燃烧的炭粒）落入分离器下的 U 形回送装置中。这个 U 形回送装置实际上也是一个流化床输送机，其底部同样装有布风板，高压空气由此进入，使 U 形回送装置中的热灰流态化，它

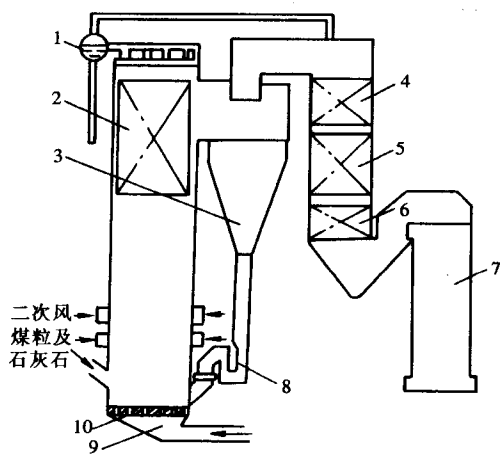


图 1-8 Ahlstrom 公司的 Pyroflow 循环流化床锅炉
1—汽包；2—屏式过热器；3—旋风分离器；4—高温过热器；5—低温过热器；6—省煤器；7—空气预热器；8—U 形回送装置；9—风箱；10—布风板

一方面形成一道灰封，防止炉膛中的烟气倒流至分离器中；同时可以方便地将流态化的热灰送回炉膛再燃烧。分离器分离出来的热烟气则进入尾部的对流受热面中。图 1-9 为循环流化床锅炉系统示意图。

4. 按锅炉蒸发受热面内工质的流动方式分类

锅炉蒸发受热面（水冷壁）内工质的流动方式与其他受热面是有差异的。例如省煤器内的工质是单相的水，水的流动是靠给水泵的压头强制流动的；过热器和再热器中的工质是单相的蒸汽，蒸汽的流动是靠进口蒸汽的压力来强制流动的，所以这些受热面内的工质流动都是强制流动，一次通过，并不往返循环。而蒸发受热面内的工质是两相的汽水混合物，它在蒸发受热面中的流动可以是循环的，也可以是一次通过的。因此，按工质在蒸发受热面内的流动方式可以将锅炉分成：自然循环锅炉、强制循环锅炉（又称辅助循环锅炉）、直流锅炉、复合循环锅炉。如图 1-10 所示。

(1) 自然循环锅炉。蒸发受热面内的工质，依靠下降管中的水和上升管中的汽水混合物之间的密度差所产生的压力差进行循环的锅炉，称为自然循环锅炉。由图 1-10 (a) 可知

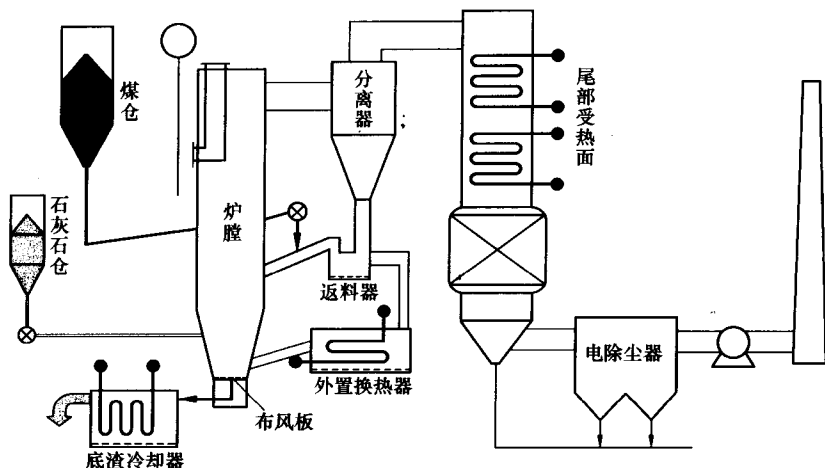
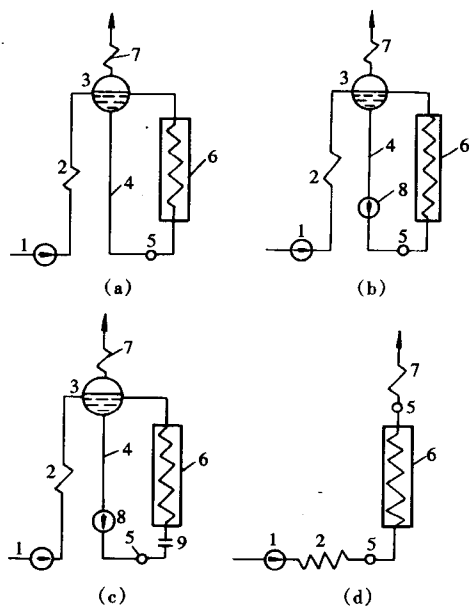


图 1-9 循环流化床锅炉系统示意图

自然循环锅炉的蒸发系统是由不受热的下降管 4、受热的蒸发管 6、联箱 5、汽包 3 及连接管道等组成。当水在蒸发管中受热时，部分水变成蒸汽，故蒸发管中为汽水混合物，而在不受热的下降管中则全部是水。因为水的密度大于汽水混合物的密度，因此有汽、水密度差产生循环推动力，借以推动水和汽水混合物在蒸发系统中流动。自然循环锅炉的循环倍率约为 4~30。自然循环锅炉是亚临界压力以下锅炉的主要形式。



如图 1-10 蒸发受热面内工质流动方式

(a) 自然循环；(b) 强制循环；

(c) 控制循环；(d) 直流锅炉

1—给水泵；2—省煤器；3—锅炉汽包；4—下降管；

5—联箱；6—水冷壁；7—过热器；8—锅水循环泵

(2) 强制循环锅炉（又称辅助循环锅炉）。

蒸发受热面内的工质除了依靠下降管中的水和上升管中的汽水混合物之间的密度差所产生的压力差以外，主要依靠锅水循环泵的压头进行循环的锅炉，称为强制循环锅炉。其循环系统示意图见图 1-10 (b)。

在水冷壁上升管的入口处加装了节流圈的强制循环锅炉，则称为控制循环锅炉。其循环系统示意图见图 1-10 (c)。控制循环锅炉在水冷壁每根上升管入口处加装了不同直径的节流圈，主要目的是调节各根上升管中的流量分配，避免在蒸发系统中出现多值性、脉动、停滞及倒流等循环故障，以及减轻水冷壁管子的热偏差。所以现代大容量的强制循环锅炉都是控制循环锅炉。

强制循环锅炉和控制循环锅炉都是在自然循环锅炉的基础上发展起来的，因此，它们在结构和运行特性等许多方面与自然循环锅炉相似，其主要差别只是在循环回路的下降管中加装了锅水循环泵。随着锅炉工作压力的提高，

水汽的密度差减小,自然循环锅炉的可靠性降低,但强制循环锅炉(包括控制循环锅炉)因为有机水循环泵,就可以主要依靠锅水循环泵的压头使工质在蒸发受热面内强制流动,而不受锅炉工作压力的限制,既能增大运动压头,又便于控制各个循环回路中的流量。控制循环锅炉的循环倍率在1.5~8之间,一般为4左右。

(3) 直流锅炉。给水靠给水泵的压头,一次通过锅炉各受热面产生蒸汽的锅炉,称为直流锅炉,如图1-10(d)所示。直流锅炉的特点是没有汽包,整台锅炉由许多管子并联,然后用联箱连接串联组成。在给水泵压头的作用下,工质依顺序一次通过加热、蒸发和过热受热面。进口的工质是水,出口工质则是符合设计要求的过热蒸汽。由于所有受热面内工质流动是靠给水泵的压头来推动的,所以在直流锅炉中,受热面中工质都是强制流动。直流锅炉循环倍率等于1。直流锅炉既可用于临界压力以下,也可设计为超临界压力。

(4) 复合循环锅炉。随着超临界压力锅炉的发展以及炉膛热强度的提高,由直流锅炉和控制循环锅炉(直流锅炉系统+再循环泵)联合发展起来的一种新的锅炉型式,称为复合循环直流锅炉,有时简称复合循环锅炉,如图1-11所示。它是依靠锅水循环泵的压头将蒸发受热面出口的部分或全部工质进行再循环的锅炉。

现用的复合循环锅炉有两种:一种是全负荷复合循环锅炉,另一种是部分负荷复合循环锅炉。

全负荷复合循环锅炉一般用于亚临界压力,其蒸发系统在整个负荷范围内均有再循环流量通过。这种锅炉的特点是无汽包,蒸发受热面中的工质流动采用强制循环,如图1-11(a)所示。从炉膛蒸发受热面出来的汽水混合物进入汽水分离器,分离出来的蒸汽送至过热器,而分离出来的水经再循环泵加压后送入省煤器出口的混合器,与给水混合后进入蒸发受热面。因而蒸发受热面中的流量大于蒸发量,但其循环倍率较低,在额定负荷下只有1.2~2.0,故又称低循环倍率锅炉。

图1-11(b)是部分负荷复合循环锅炉的系统图。这种锅炉的蒸发系统在部分负荷(低负荷)时,按再循环原理工作,但在高负荷时,调节阀关闭,按纯直流原理工作。从纯直流工况切换到再循环工况时的负荷,由不同情况而定。一般在额定负荷的65%~80%之间,锅炉容量大的可取低值。这种型式的锅炉可用于亚临界压力,但多用于超临界压力。在超临界压力时,图1-11(b)的系统中则取消了汽水分离器。

两种复合循环锅炉的主要区别:一是复合循环锅炉在高负荷(例如65%~80%负荷以上)时,锅炉转入纯直流运行方式;二是复合循环锅炉的循环泵装在混合器前的再循环管路中。

5. 按锅炉排渣的相态分类

按锅炉排渣的相态,可以分为固态排渣和液态排渣锅炉两种。固态排渣锅炉是指从锅炉

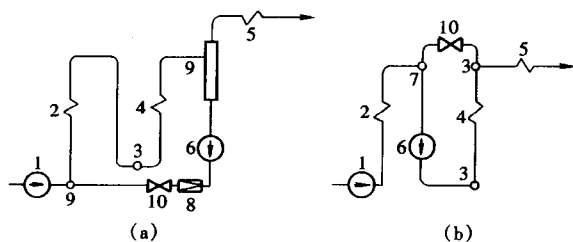


图1-11 复合循环系统

(a) 全负荷复合循环锅炉; (b) 部分负荷复合循环锅炉

1—给水泵; 2—省煤器; 3—联箱; 4—蒸发受热面; 5—过热器;
6—强制循环泵; 7—混合器; 8—止回阀; 9—汽水分离器; 10—调节阀