



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

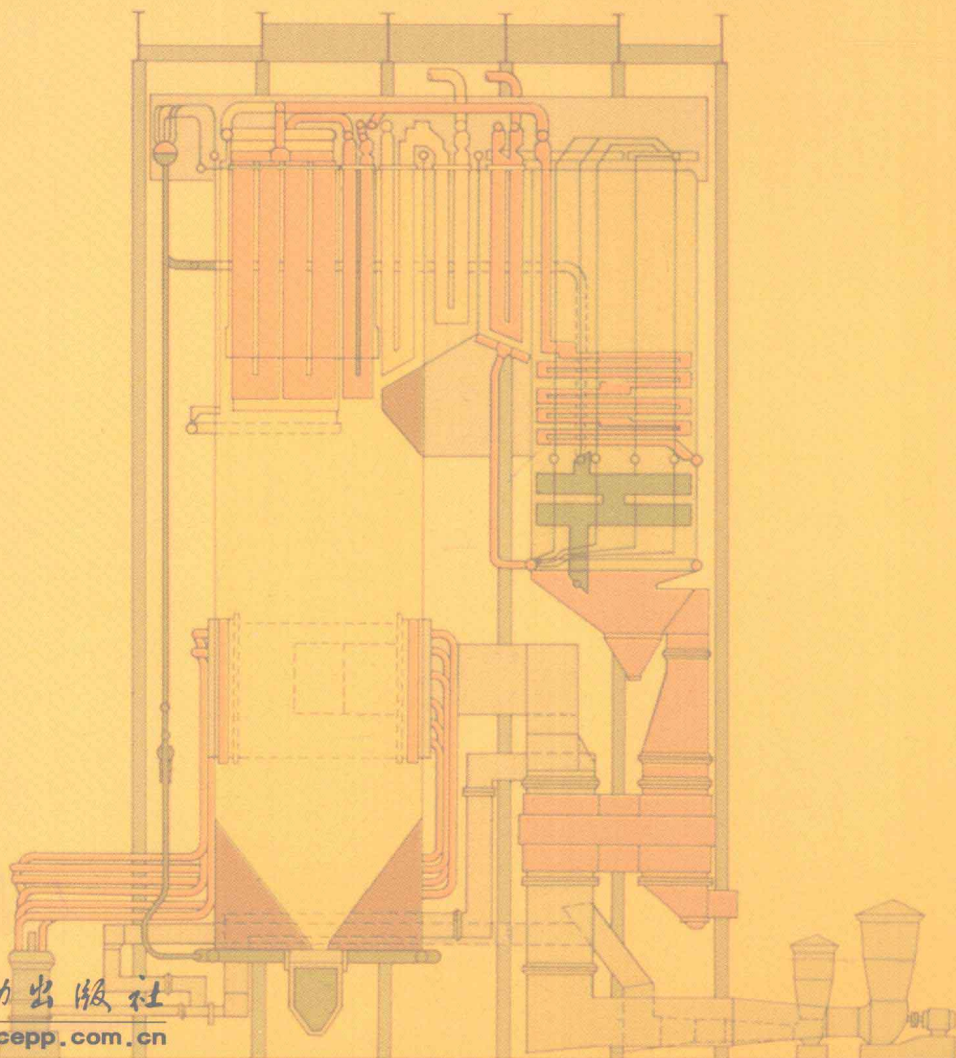
电厂锅炉

(第二版)

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

(第二版)

周菊华 操高城 郝 杰 合编
容奎恩 樊泉桂 主审



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

本书结合火力发电厂 300、600MW 及以上机组的锅炉设备、系统和技术特点组织编写。主要内容包括：电厂锅炉概述，锅炉设备、系统及其工作原理，燃料特性及燃烧计算，锅炉机组热平衡，制粉设备、系统及运行，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，以超临界参数为主的强制流动锅炉，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，锅炉运行、锅炉吹灰、除尘、除渣设备、系统等。

本书可作为高职高专电力技术类电厂热能动力装置专业、火电厂集控运行专业、自动化类检测技术及应用专业教学用书，也可作为火电厂锅炉检修工、锅炉运行值班员和集控运行值班员的技术培训和技能鉴定用书。

图书在版编目(CIP)数据

电厂锅炉/周菊华，操高城，郝杰合编. —2
版. —北京：中国电力出版社，2009
教育部职业教育与成人教育司推荐教材
ISBN 978-7-5083-8944-8

I. 电… II. ①周…②操…③郝… III. 火电
厂-锅炉-职业教育-教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第
093242 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

2009 年 8 月第二版 2009 年 8 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28.5 印张 558 千字

定价 36.80 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

本书为《教育部职业教育与成人教育司推荐教材 电厂锅炉》的修订版。为了使专业教学适应科学技术的发展,适应培养高层次应用型、技能型人才需要,考虑国内电厂现阶段实际情况,开展了此次修订工作。内容突出了亚临界和超临界参数锅炉的设备、系统和工作原理,引进了许多的新技术和新方法,反映了国内外锅炉专业范围内技术设备的新成就,是一本具有高职院校专业特色的教材。

在引入工程实践、突出基本概念、注重技能训练的人才培养理念指导下,本次修订补充了超临界压力直流锅炉原理、设备,等离子点火、锅炉机组运行等新技术内容,删除或简化了部分公式推导的计算内容。

本书可作为高职高专电力技术类专业“电厂锅炉”课程的教材,也可作为 300、600MW 火电机组在岗员工技术培训和职业技能鉴定用书。

本书由武汉电力职业技术学院周菊华、山西电力职业技术学院操高城、保定电力职业技术学院郝杰联合编写,周菊华负责统稿。其中,周菊华编写了前言,第一、四、五、十二章;操高城编写了第七~九章、第十一章;郝杰编写了第二、三、六、十、十三章。本书由华中科技大学容鑫恩教授和华北电力大学樊泉桂教授主审。

在此次修订过程中,武汉电力职业技术学院陈丽霞、景朝晖老师参加修订稿的讨论,并提出了许多宝贵的建议和意见,在此,编者对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,书中难免有缺点和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2009 年 7 月

第一版前言

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，内容密切结合热动力装置专业、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内容。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、山西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。全书由武汉电力职业技术学院周菊华统稿。

本书由华中科技大学教授容釜恩主审，容釜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，特此向容釜恩教授表示深切的谢意。

本书在讨论编写大纲过程中，得到华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

第一版前言

第一章 绪论	1
第一节 电厂锅炉的工作过程	1
第二节 电厂锅炉的容量、参数和分类	4
第三节 锅炉的安全和经济指标	10
第四节 电厂锅炉的发展概况	12
复习思考题	16
第二章 燃料及燃料的燃烧计算	18
第一节 煤的成分及其性质	18
第二节 燃烧反应和空气量计算	30
第三节 烟气分析和烟气容积	32
复习思考题	40
第三章 锅炉热平衡	41
第一节 锅炉热平衡的概念	41
第二节 锅炉的输入热量及有效利用热量	42
第三节 锅炉各项热损失	44
第四节 锅炉燃料消耗量	48
第五节 锅炉热平衡试验方法	50
复习思考题	53
第四章 煤粉制备	54
第一节 煤粉的性质	54
第二节 磨煤机	58
第三节 制粉系统及主要辅助设备	69
第四节 制粉系统的运行调节	80
复习思考题	85
第五章 燃烧基本原理及燃烧设备	87
第一节 燃料燃烧的基本原理	87
第二节 煤粉气流的燃烧过程	92
第三节 燃烧器和煤粉燃烧新技术	97
第四节 煤粉锅炉的炉膛	118
第五节 油燃烧器及点火装置	121

复习思考题	127
第六章 蒸发设备及循环原理	129
第一节 蒸发设备	129
第二节 自然循环原理	136
第三节 自然循环常见故障	142
复习思考题	148
第七章 蒸汽净化	149
第一节 蒸汽污染	149
第二节 提高蒸汽品质的途径	156
第三节 典型汽包内部装置示例	166
复习思考题	170
第八章 过热器和再热器	171
第一节 过热器、再热器的作用及结构形式	171
第二节 热偏差	182
第三节 汽温调节	188
第四节 过热器、再热器的高温积灰与高温腐蚀	194
复习思考题	198
第九章 省煤器和空气预热器	199
第一节 省煤器	199
第二节 空气预热器	204
第三节 尾部受热面积灰、磨损和低温腐蚀	215
复习思考题	224
第十章 强制流动锅炉	225
第一节 控制循环锅炉	225
第二节 直流锅炉	231
第三节 低循环倍率锅炉和复合循环锅炉	242
第四节 直流锅炉蒸发受热面中的流动及传热	248
复习思考题	256
第十一章 锅炉整体布置	257
第一节 电厂锅炉整体布置	257
第二节 典型锅炉简介	261
复习思考题	270
第十二章 吹灰、除尘、除灰设备及系统	271
第一节 吹灰系统及设备	271
第二节 除尘设备	275
第三节 锅炉除灰除渣系统	289
第四节 锅炉气力除灰系统	297
第五节 气力除灰设备和除灰管道	306
复习思考题	315

第十三章 电厂锅炉运行..... 317

 第一节 汽包锅炉的启动..... 317

 第二节 汽包锅炉的停运..... 324

 第三节 汽包锅炉的运行调节..... 328

 第四节 直流锅炉的启停和运行..... 340

 第五节 锅炉常见事故..... 348

 复习思考题..... 355

参考文献..... 356

绪 论

第一节 电厂锅炉的工作过程

一、电厂锅炉的作用

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膨胀做功，高速汽流推动汽轮机转子并带动发电机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，并在凝汽器中被循环水泵提供的冷却水冷凝成为凝结水，凝结水经凝结水泵升压后打入低压加热器，利用汽轮机的抽汽将其加热后送入除氧器中加热并除氧，除氧后的凝结水连同补给水由给水泵升压，经高压加热器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。

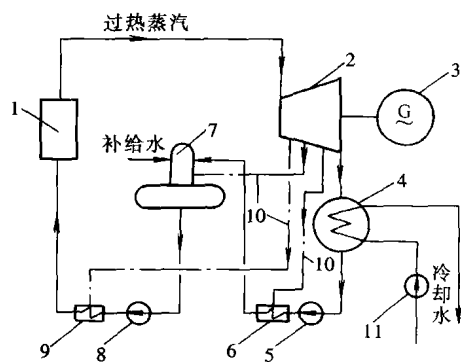


图 1-1 火力发电厂生产过程示意
1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—低压加热器；7—除氧器；8—给水泵；9—高压加热器；10—汽轮机抽汽管道；11—循环水泵

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

1. 电厂锅炉的构成

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

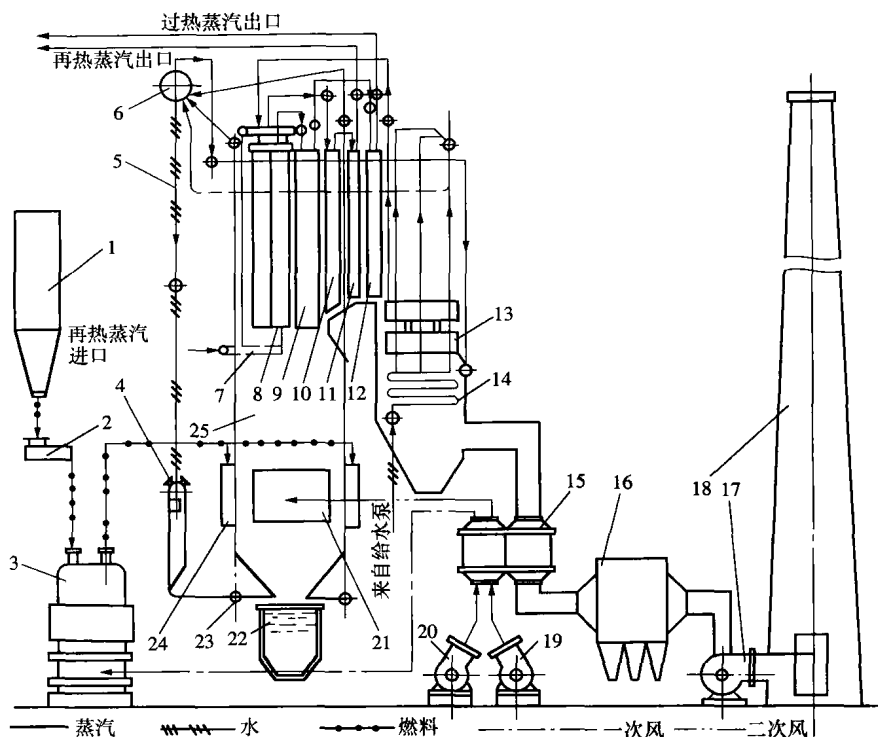


图 1-2 电厂锅炉机组构成及生产过程示意简图

- 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

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。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以及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、烟气脱硫脱硝系统、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。

2. 电厂锅炉的工作过程

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，从原煤斗靠自重落下的煤，经过给煤机送入磨煤机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，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、高温过热器、低温过热器、省煤器、空气预热器等受热面。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，沉降于炉膛底部的冷灰斗中，形成固态渣，最后由除渣装置排出，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，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通过烟囱排至大气。

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”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。

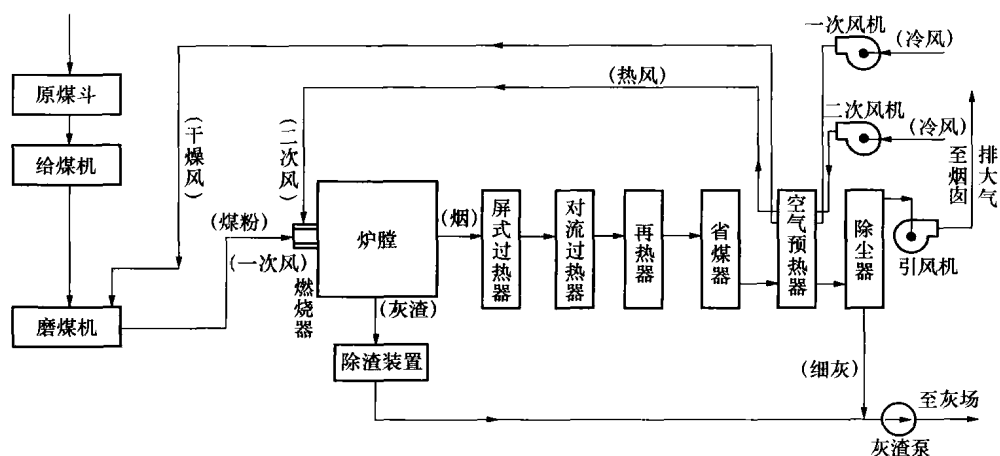


图 1-3 锅炉燃烧系统流程

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。

以上与汽水系统有关的受热面和管道系统称为锅炉的汽水系统。锅炉的“锅”是指汽水系统。与汽水有关的受热面和管道系统称为锅炉的汽水系统。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。

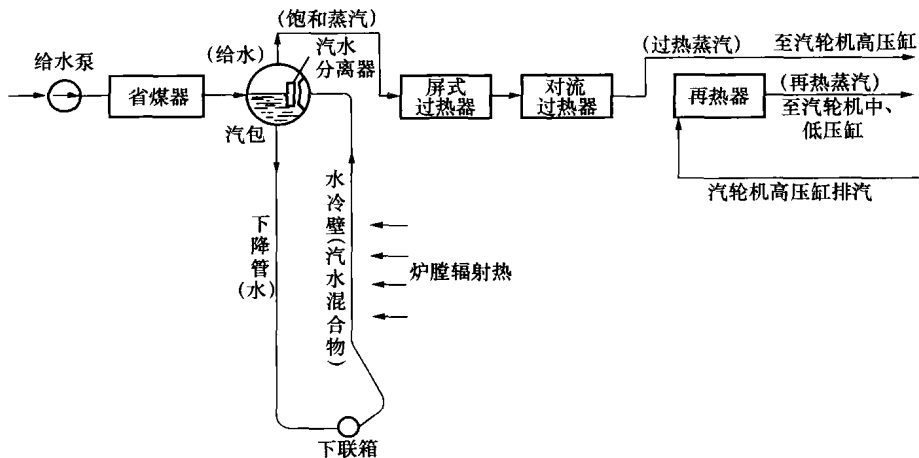


图 1-4 锅炉汽水系统流程

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。

第二节 电厂锅炉的容量、参数和分类

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 300、600、1000MW 等。

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 $BMCR = (1.03 \sim 1.2)$ 锅炉额定蒸发量。

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 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、800、1000MW 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 是我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 ($^{\circ}\text{C}$)	BMCR (t/h)	汽轮发电机功率 (MW)
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
26.25	600/600	290~298	2953	1000

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循环倍率锅炉的容量及参数

机组功率 (MW)	500	600	800	1000
过热蒸汽流量 MCR (t/h)	1650	1900	2650	2953
再热蒸汽流量 (t/h)	1481	1613	2151.5	2446
过热蒸汽压力 (MPa)	25.0	25.4	25.0	27.56
再热蒸汽压力 (MPa)	4.15/3.9	4.77/4.57	3.86/3.62	6.14/5.94
过热蒸汽温度 (°C)	545	541	545	605
再热蒸汽温度 (°C)	295/545	338/566	283/545	377/603
给水温度 (°C)	270	286	277	298
燃煤量 (t/h)	208		336.5	
燃烧方式	对冲燃烧	四角燃烧	对冲燃烧	四角燃烧
水冷壁形式	垂直管屏	螺旋管圈	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。

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 ($p \leq 2.45\text{MPa}$)、中压锅炉 ($p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$)、高压锅炉 ($p = 7.84 \sim 10.8\text{MPa}$)、超高压锅炉 ($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$)、亚临界压力锅炉 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$)、超临界压力锅炉 ($p \geq 22.1\text{MPa}$)。

发电功率等于或大于 600MW 的锅炉一般采用亚临界压力或超临界压力的锅炉。我国发展超临界火电机组的起步容量定为 600MW; 从技术性、经济性以及机组配套用材料方面考虑, 参数初步定为 24.0~25.0MPa、温度 538~566°C、一次再热。

3. 按炉内燃烧过程的气体动力学原理分类

(1) 火床燃烧锅炉。固体燃料以一定厚度分布在炉排上进行燃烧的锅炉称为火床炉, 它的工作特点是: 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体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、人工炉等多种形式。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 1-5。链条炉只用于 1~65t/h 的小容量、低参数工业锅炉中。

(2) 火室燃烧锅炉。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，其结构示意图可参见图 1-2。

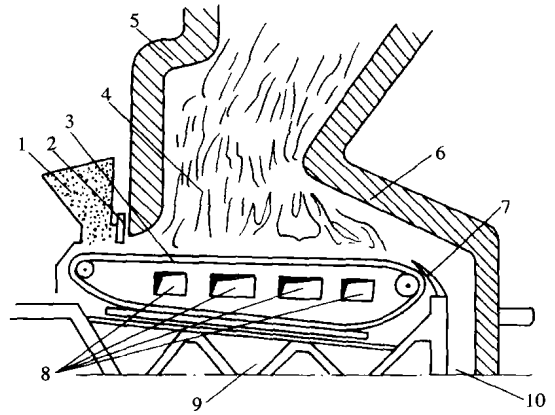


图 1-5 链条炉结构示意图

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

(3) 旋风燃烧锅炉。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。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。

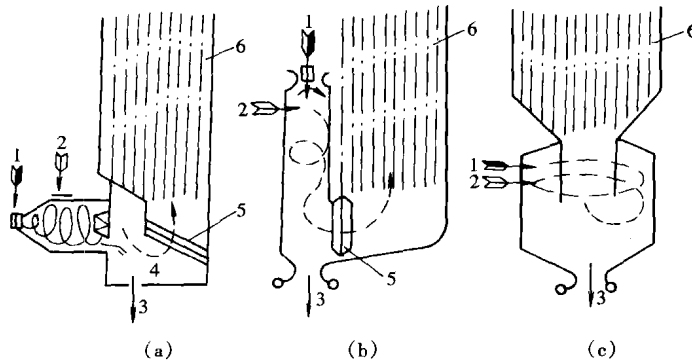


图 1-6 旋风炉的结构示意

(a) 卧式旋风锅炉；(b) ВТИ 立式旋风锅炉；(c) KSG 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

(4) 循环流化床燃煤锅炉。循环流化床燃煤锅炉基于循环流态化组织煤的燃烧过程，以携带燃料的大量高温固体颗粒物料的循环燃烧为重要特征。固体颗粒充满整个炉膛，处于悬浮并强烈掺混的燃烧方式。

循环流化床燃煤锅炉的燃烧与烟风流程示意图 1-7。经过预热的一次风（流化风）经过风室由底部穿过布风板送入炉膛，炉膛内固体处于快速流化状态，燃料在充满整个炉膛的惰性床料中燃烧。较细小的颗粒被气流夹带飞出炉膛，并由飞灰分离器收集，通过分离器下的回料管与飞灰回送器（返料器）送回炉膛循环燃烧；燃料在燃烧系统内完成燃烧和高温烟向工质的部分热量传递过程。烟气和未被分离器捕集的细颗粒排入尾部烟道，继续与受热

面进行对流换热,最后排出锅炉。图 1-8 为循环流化床锅炉系统示意。

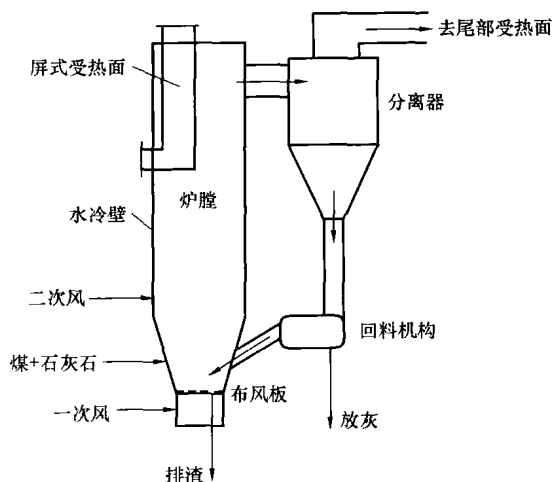


图 1-7 循环流化床锅炉炉内燃烧与烟气流程

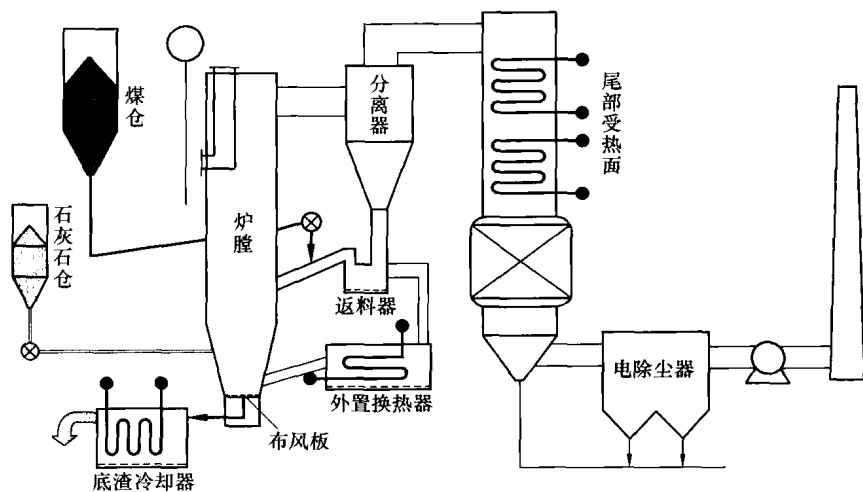


图 1-8 循环流化床锅炉系统示意

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 1-9 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 1-9 (a) 可知自然

循环锅炉的蒸发系统是由不受热的下降管、受热的蒸发管、联箱、汽包及连接管道等组成。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。

(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 1-9 (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 1-9 (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。

(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 1-9 (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。

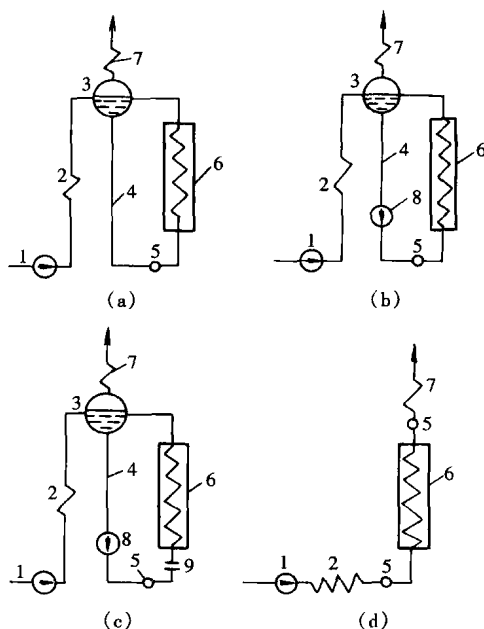


图 1-9 蒸发受热面内工质流动方式

(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

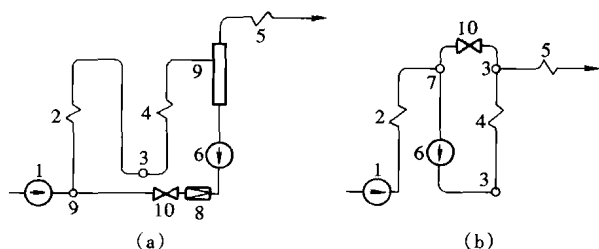


图 1-10 复合循环系统

(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

(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形式，称为复合循环直流锅炉，有时简称复合循环锅炉，如图 1-10 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