



21世纪

高等学校精品规划教材

锅炉原理与设备

主 编 徐生荣

副主编 苏 磊 卢 平



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校精品规划教材

锅炉原理与设备

主 编 徐生荣

副主编 苏 磊 卢 平



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以 35~220t/h 中压和高压锅炉为主要对象,全面、系统地阐述了锅炉的主要系统及工作原理。内容包括:锅炉燃料与热平衡、锅炉制粉系统及设备、锅炉燃烧原理与燃烧设备、锅炉受热面的结构及锅炉的整体布置、锅炉传热过程及锅炉热力计算、锅炉水循环及汽水分离、锅炉设备通风及空气动力计算、锅炉受压元件强度计算介绍及锅炉用钢材及其性能、锅炉运行及事故处理。

本书主要用作高等学校热能动力工程专业教材和热电企业培训部门的教学用书,还可作为相关专业人员自学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉原理与设备 / 徐生荣主编. —北京:中国水利水电出版社, 2009

21 世纪高等学校精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6794 - 8

I. 锅… II. 徐… III. 锅炉-高等学校-教材 IV. TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 150586 号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 锅炉原理与设备
作 者	主编 徐生荣 副主编 苏磊 卢平
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 20 印张 474 千字
版 次	2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	34.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书以中压和高压锅炉为主要对象，全面、系统地阐述了锅炉的主要系统及工作原理。内容包括：锅炉燃料与热平衡、锅炉制粉系统及设备、锅炉燃烧原理与燃烧设备、锅炉受热面的结构及锅炉的整体布置、锅炉传热过程及锅炉热力计算、锅炉水循环及汽水分离、锅炉设备通风及空气动力计算、锅炉受压元件强度计算介绍及锅炉用钢材及其性能、锅炉运行及事故处理。

本书主要用做高等学校热能与动力工程专业以及相关专业的教材和热电企业培训部门的教学用书，还可作为读者自学用书。

全书共分十一章，由徐生荣副教授任主编，并负责第一章、第四章、第六章、第七章、第十一章的编写；卢平教授任副主编，并负责第三章、第五章、第八章的编写；苏磊副教授任副主编并负责第九章、第十章的编写；祝秀明副教授负责第二章的编写。全书由江苏省锅炉学会理事长赵孝保教授担任主审工作。在编写过程中得到了南京师范大学、南京工业大学、东南大学等相关同志的大力支持和帮助，在此表示感谢。

编者在编写过程中参考了大量的标准和规范以及相关的教材和技术资料，并选用了部分图表，在此向原作者表示衷心的感谢。

本书知识面覆盖范围较广，涉及的标准和规范较多，由于编者水平所限，加之时间仓促，书中难免存在不足和漏误之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2009年8月

前言

第一章 绪论	1
第一节 锅炉的系统构成及工作过程	1
第二节 锅炉的表示方法	3
第三节 锅炉的分类	5
第四节 典型锅炉基本结构介绍	8
第五节 锅炉技术的发展	11
第二章 燃料及燃烧产物	15
第一节 燃料的成分及其主要特性	15
第二节 燃料的燃烧特性	18
第三节 燃料的燃烧计算	25
第四节 烟气分析及其应用	28
第五节 空气与烟气焓的计算	31
第三章 锅炉热平衡	34
第一节 锅炉热平衡的组成	34
第二节 锅炉各项热损失	35
第三节 锅炉热效率与燃料消耗量	41
第四节 锅炉热平衡试验方法	42
第四章 煤粉制备系统及设备	46
第一节 煤粉的性质	46
第二节 磨煤设备及其特性	47
第三节 制粉系统	56
第四节 制粉系统主要辅助设备	60
第五节 煤粉制备系统的选型与计算	65
第五章 锅炉燃烧原理与燃烧设备	70
第一节 燃烧的基本理论	70
第二节 层燃炉	78
第三节 煤粉炉	84
第四节 循环流化床锅炉	100

第五节	油气燃烧器	111
第六节	锅炉燃烧器的布置及其特性	121
第七节	燃烧调整试验方法	128
第六章	锅炉锅内工作过程	133
第一节	锅炉的蒸发设备	133
第二节	自然循环锅炉的水循环	138
第三节	两相流的流型和传热	146
第四节	强制流动锅炉	150
第五节	蒸汽污染的原因及其危害	158
第六节	汽水分离和蒸汽清洗装置	164
第七章	过热器和再热器	170
第一节	过热器和再热器的作用与工作特点	170
第二节	过热器和再热器的结构型式	172
第三节	热偏差	177
第四节	蒸汽温度调节	181
第八章	省煤器和空气预热器	192
第一节	省煤器	192
第二节	空气预热器	200
第三节	尾部受热面的布置	205
第九章	锅炉布置及其计算	207
第一节	锅炉整体布置及其主要设计参数的选择	207
第二节	锅炉炉膛热力计算	213
第三节	锅炉对流换热计算	224
第四节	锅炉空气动力计算	242
第五节	锅炉强度计算	249
第十章	锅炉受热面外部工作过程	261
第一节	锅炉炉膛结渣	261
第二节	水冷壁的高温腐蚀	265
第三节	对流受热面的高温积灰和高温腐蚀	268
第四节	低温受热面的积灰、磨损和腐蚀	271
第五节	锅炉受热面的吹灰	279
第十一章	锅炉运行及事故处理	284
第一节	汽包锅炉的启动	284
第二节	汽包锅炉的运行调节	292
第三节	制粉系统的运行	300
第四节	锅炉停炉	304
第五节	锅炉事故分析及其处理	307
参考文献		314

第一章 绪 论

电力工业是国民经济发展的基础工业，电力工业的发展水平和电能供应的数量和质量是衡量工业、农业、国防和科技现代化水平的重要标准。发电能源的种类很多，如火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电、地热能发电、潮汐发电等。当前，世界上主要有三类发电形式：火力发电、水力发电和核能发电。而从总体上讲，火力发电仍然是世界电能生产的主要形式。我国由于能源构成的特点更是如此，其中火力发电约占发电量的 80%。

锅炉在国民经济中具有重要的地位，它是火力发电厂三大主机之一，同时也是机械、冶金、化工、纺织、造纸、食品等工业生产工艺的供汽、供热设备。

现代机械制造、化工、纺织、造纸、冶金工业规模比较大，都建有自备电站，企业自备电站（热电联产）规模也很大，锅炉容量、蒸汽参数与电站锅炉相差不大。而为民用建筑的采暖提供热源的工业锅炉容量相对较小、蒸汽参数较低，锅炉结构与电站锅炉相差很大。

第一节 锅炉的系统构成及工作过程

锅炉是生产蒸汽和热水的高温高压换热设备，由汽锅和炉子两部分组成，主要由燃料制备系统（制粉系统）、烟风系统、汽水系统和控制系统等组成。

一、锅炉的系统构成

1. 燃料制备系统（制粉系统）

原煤由原煤仓依次经过煤闸门、电磁铁、电子秤、给煤机，经下行干燥管进入磨煤机，经过磨煤机将其磨制成一定细度的煤粉，再引用一次风（排粉风机送入的热风）干燥、混合成气粉混合物，然后被输送到燃烧器喷入炉膛着火燃烧，如图 1-1 所示。

2. 烟风系统

送风机将冷空气送入空气预热器加热，再将加热后的热空气分别送至排粉风机、燃烧器。其中排粉机将热风（一次风）送入磨煤机，干燥煤粉，同时将干燥的煤粉输送到燃烧器喷入炉膛着火燃烧。热风由燃烧器引入炉膛，提供煤粉完全燃烧所需要的空气量（二次风）。煤粉在炉内着

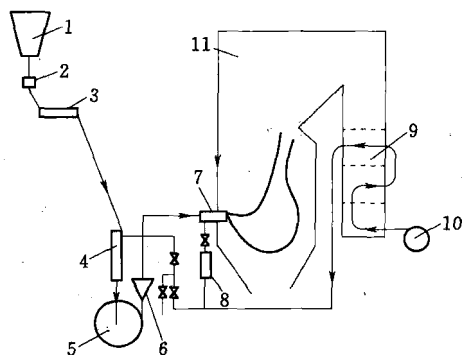


图 1-1 直吹式制粉系统工作流程

- 1—原煤仓；2—电子秤；3—给煤机；4—下行干燥管；5—磨煤机；6—煤粉分离器；7—燃烧器；8—二次风箱；9—空气预热器；10—送风机；11—锅炉

火后，与空气混合燃烧产生火焰和高温烟气（燃烧中心烟温高达 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ），同时辐射放热被炉膛辐射受热面（水冷壁）吸热冷却，至炉膛出口处被冷却至 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 。高温烟气离开炉膛依次流经屏式过热器（辐射式过热器）、对流过热器高温段、对流过热器低温段、再热器、省煤器、再生式空气预热器（烟气侧）与其受热面进行对流换热，经过静电除尘器除尘、脱硫装置脱硫后，由引风机抽吸至烟囱排出，如图 1-2 所示。

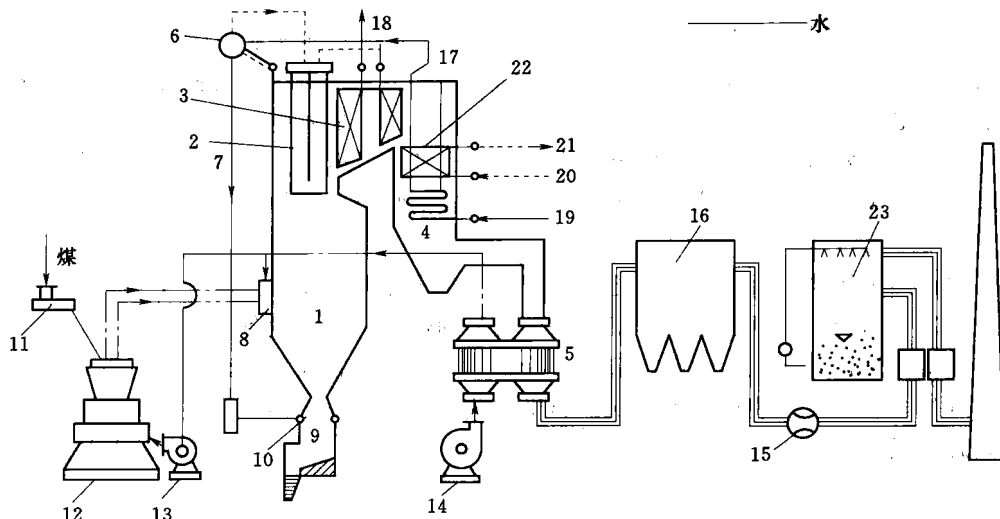


图 1-2 锅炉工作过程示意图

- 1—水冷壁；2—屏式过热器；3—对流式过热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；7—下降管；8—燃烧器；
9—排渣装置；10—水冷壁下集箱；11—给煤机；12—磨煤机；13—排粉机；14—送风机；15—引风机；
16—静电除尘器；17—省煤器出口集箱；18—过热蒸汽；19—给水；20—再热蒸汽进口集箱；
21—再热蒸汽进口集箱；22—再热器；23—脱硫装置

3. 汽水系统

锅炉的给水来自汽轮机车间的给水回热加热系统中，经过低压加热器、除氧器、除氧水再经过给水泵加压送入高压加热器加热，然后送入锅炉。锅炉给水进入省煤器加热，引入锅汽包与锅水混合。锅水由下降管进入水冷壁下集箱，再由下集箱将锅水均匀分布给每根水冷壁管（上升管）。锅水在水冷壁管内吸收炉内辐射换热热量，锅水被加热、蒸发汽化形成汽水混合物，汽水混合物进入汽包，经过汽水分离后形成干饱和蒸汽。干饱和蒸汽由汽包上方引入炉顶顶棚过热器及后包墙管过热器，再依次流经低温对流过热器、屏式过热器（辐射式过热器），最后经高温对流过热器加热到额定的蒸汽参数，如图 1-2 所示。

为了提高锅炉—汽轮机组的循环热效率，对大容量、超高参数的锅炉要采用蒸汽再热技术，这项任务由再热器完成。

二、锅炉的工作过程

由上述可知，锅炉的工作过程由以下 3 个同时进行的过程组成。

(1) 燃料的燃烧过程。燃料由燃料系统输送到燃烧设备（燃烧器），进入炉膛着火后，与空气混合，燃烧产生火焰和高温烟气。

(2) 烟气向工质的传热过程。炉内的火焰和高温烟气与受热面之间，通过辐射、对流以及热传导等传热方式，将热量传递给受热面管内的工质（水和蒸汽）。

(3) 水的加热与汽化过程。受热面管内的水在一定压力下，吸收管壁的热传导及水的对流放热热量使水加热，以至蒸发汽化、过热。

第二节 锅炉的表示方法

一、锅炉的基本特性

表征锅炉设备基本特征的有锅炉的容量、蒸汽参数、锅炉热效率、钢材使用率、锅炉燃料、锅炉受热面以及锅炉本体布置等方面。

1. 锅炉容量

锅炉的容量用额定蒸发量来表示，一般是指蒸汽锅炉在额定蒸汽参数（压力、温度）、额定给水温度、使用设计燃料和保证的锅炉效率条件下所规定的蒸发量，常用符号 D 来表示，单位为 t/h 或 kg/s 。锅炉最大连续蒸发量（BMCR）是指在额定蒸汽参数、额定给水温度和燃用设计煤种时，长期连续运行时所能达到的最大连续蒸发量，单位为 t/h 。习惯上，电站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 锅炉。对热水锅炉反映出力的是热功率或供热量，单位为 MW。

2. 锅炉蒸汽参数

锅炉的蒸汽参数是指锅炉出口处的蒸汽温度和蒸汽压力。蒸汽温度常用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}C$ ，蒸汽压力常用符号 p 表示，单位为 MPa。锅炉设计时所规定的蒸汽温度和蒸汽压力称为额定蒸汽温度和额定蒸汽压力。饱和蒸汽锅炉的蒸汽参数一般用锅炉出口的饱和蒸汽压力来表示。对热水锅炉反映锅炉参数的是热水的压力和进出口温度。

3. 锅炉热效率

锅炉热效率为锅炉输出有效利用热量与输入锅炉总热量的百分比。锅炉净热效率是锅炉输出有效利用热量扣除锅炉自用蒸汽和自用电能后与输入锅炉总热量的百分比。

4. 钢材使用率

钢材使用率是锅炉每 t/h 蒸发量所用钢材的吨数。锅炉的容量越小、蒸汽参数越高则钢材使用率越大，一般来说，电厂各种锅炉的钢材使用率约在 $2.5 \sim 5t \text{ 钢}/(t/h)$ 范围内。

5. 锅炉燃料

锅炉所用燃料是多种多样的，有煤、油、气体及其他可燃物。在我国，由于煤炭资源丰富，而且分布地区广，所以常以煤作为锅炉的主要燃料。对于不同的燃料，锅炉的燃烧方式不同，锅炉的结构也不一样。

6. 锅炉受热面

锅炉的受热面，包括加热水的省煤器、使水汽化的蒸发受热面和加热过热蒸汽的过热器，不论哪种受热面，都应能随时把热量带走以保证受热面金属的正常工作，所以其内部工质应该不断流动。

7. 锅炉的整体布置

锅炉的整体布置是指炉膛、对流烟道以及各级受热面之间的相对位置。

二、锅炉的安全指标

除了上述表征锅炉设备的基本特征外，锅炉特征还可以用锅炉的安全指标来表示。

在工业生产中，尤其在火力发电厂中，锅炉是重要设备之一，它的安全性和经济性对生产十分重要。而锅炉又是高温、高压的大型设备，一旦发生爆炸或破裂事故，将是非常危险的。锅炉的安全性常用下述几种指标来衡量。

- (1) 连续运行小时数。连续运行小时数为两次检修之间运行的小时数。

- (2) 事故率。事故率为事故停运小时数占总的运行小时数与事故停运小时之和的百分比。

- (3) 可用率。可用率为运行小时数与备用小时数占统计期间总的小时数的百分比。

事故率和可用率按一适当长的周期来计算。我国通常以 1 年为一个统计周期，连续运行小时数越长，事故率越低，可用率越高，锅炉的安全可靠性就越高。

三、工业锅炉型号的表示方法

工业锅炉型号由三部分组成，各部分之间用短横线相连。

^ ^ ^ x x - x x x / x x x - x

第一部分表示锅炉型式，燃烧方式和蒸发量，共分三段。第一段用两个汉语拼音字母代表锅炉本体型式；第二段用一个汉语拼音代表燃烧方式；第三段用阿拉伯数字表示蒸发量。

第二部分表示蒸汽（或热水）参数，共分两段，中间用斜线分开。第一段用阿拉伯数字表示额定蒸汽压力或允许工作压力；第二段用阿拉伯数字表示过热蒸汽（或热水）温度。

第三部分表示燃料种类，以拼音字母和罗马数字分别代表燃料类别和分类。

例如 SHL10-1.3-A II 表示双锅筒横置 (SH) 式链条炉排 (L) 锅炉, 额定蒸发量 10t/h, 额定压力为 1.3MPa (表压力, 下同), 出口蒸汽温度为饱和温度, 燃用 II 类烟煤 (A II); QXS120-0.8/130/80-Y 表示强制循环 (QX) 室燃 (S) 锅炉, 额定热功率为 120MW, 允许工作压力为 0.8MPa, 出水温度 130℃, 进水温度为 80℃, 燃料为油 (Y); DHS65-3.9/435-W II 表示单锅筒横置 (DH) 室燃 (S) 锅炉, 额定蒸发量 65t/h, 额定压力为 3.9MPa, 出口蒸汽温度 435℃, 燃用 II 类无烟煤 (W II)。

四、电站锅炉型号的表示方法

电站锅炉型号通常用一组规定的符号和数字来表示。它反映了锅炉产品的制造厂家、容量大小、参数高低、性能和规格等。国产电站锅炉型号一般表示方式如下：

$$\triangle\triangle-xxx/xxx-xxx/xxx-x$$

第一组为符号,是锅炉制造厂家的汉语拼音缩写。如 HG——哈尔滨锅炉厂、SG——上海锅炉厂、DG——东方锅炉厂、WG——武汉锅炉厂、BG——北京锅炉厂等。

第二组为数字。斜线前为锅炉容量,单位为 t/h,斜线后为锅炉出口过热蒸汽压力,单位为 MPa。

第三组也是数字。斜线前后分别表示过热蒸汽和再热蒸汽出口温度，单位为℃。

最后一组中，符号表示燃料代号，而数字表示设计序号，煤、油、气的燃料代号分别是 M、Y、Q。其他燃料代号是 T。

例如 HG-1000/16.7-540/540-M8 表示哈尔滨锅炉厂制造、锅炉容量为 1000t/h，其过热蒸汽压力为 16.7MPa，过热蒸汽和再热蒸汽出口温度均为 540℃，设计燃料为煤，设计序号为 8。

第三节 锅炉的分类

锅炉分类的方法很多，主要有以下几种。

1. 按用途分类

锅炉按用途可分为工业锅炉和电站锅炉。工业锅炉是机械、冶金、化工、纺织、造纸、食品等工业生产工艺的供汽、供热设备，也是民用建筑的采暖供热热源；电站锅炉为汽轮机提供蒸汽，在汽轮机中蒸汽的热能转化为机械能，在发电机中机械能转化为电能。

2. 按蒸汽参数分类

按蒸汽压力的高低，可将锅炉分为低压锅炉 ($p \leq 2.45\text{MPa}$ ，表压，下同)、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 ($p = 11.8 \sim 14.78\text{MPa}$)、亚临界压力锅炉 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$) 和超临界压力锅炉 ($p \geq 22.1\text{MPa}$) 等。

我国部分电站锅炉和工业锅炉的蒸汽参数系列见表 1-1。

表 1-1 典型锅炉的简况

压力类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (℃)	给水温度 (℃)	容量 (t/h)	配套机组 (MW)	汽水流动方式
低 压	2.45	400	104	20~65	1.5~3	自然循环
中 压	3.82	450	150	35~130	3~12	自然循环
高 压	9.8	540	215	220/410	50/100	自然循环
超高压	13.7	540/540	240	400/670	125/200	自然循环
亚临界压力	16.7	540/540	260	1000	300/600	自然循环/控制循环
超临界压力	25	545/545	275	1000~2650	300~800	直流
超超临界压力	27	600/600	298	1970~3100	660~1030	直流

3. 按锅炉容量分类

按照容量的大小，锅炉有小型、中型和大型之分，但它们之间没有固定的分界。随着锅炉工业的发展，锅炉的容量日益增大，以往的大型锅炉目前只能算中型甚至小型锅炉。

根据目前的情况，对于电站锅炉一般认为，锅炉容量 $D_e < 400\text{t/h}$ 的是小型锅炉； $D_e = 400 \sim 670\text{t/h}$ 的是中型锅炉；而 $D_e > 670\text{t/h}$ 的是大型锅炉。表 1-1 中同时列出了几种典型锅炉的蒸发量及与之配套的汽轮发电机组的电功率的简况。

4. 按燃烧方式分类

按燃料在锅炉中的燃烧方式不同，锅炉可分为层燃炉、室燃炉、旋风炉和流化床锅炉等，如图 1-3 所示。

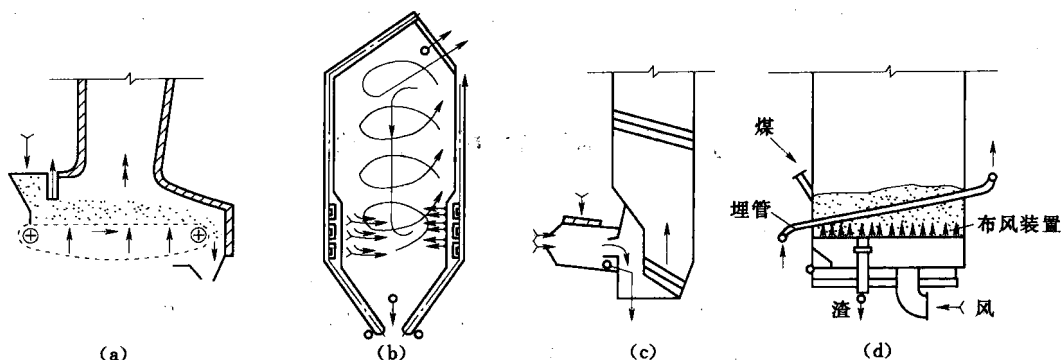


图 1-3 锅炉燃烧方式

(a) 层燃炉；(b) 室燃炉；(c) 旋风炉；(d) 流化床炉

层燃炉具有炉排，煤块或其固体燃料主要在炉排上的燃料层内燃烧。燃烧所需空气内炉排下的风箱送入，穿过燃料层进行燃烧反应。此类锅炉多为小容量、低参数的工业锅炉。

室燃炉是目前电站锅炉的主要型式，燃油炉、燃气炉以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，又可分为固态排渣炉（如图 1-2 所示）和液态排渣炉。在我国电站锅炉中，以固态排渣炉为主。

旋风炉是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。筒内的高速放转气流使燃烧加速，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和混合，着火燃烧速度快、效率高，床内安置有以水和蒸汽为冷却介质的埋管，使床层温度控制在 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。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。

5. 按水的循环方式分类

按照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。这几种不同类型锅炉的示意图如图 1-4 所示。

自然循环锅炉如图 1-4 (a) 所示。蒸发设备由不受热的下降管、受热的蒸发管、水冷壁下集箱和汽包组成。它们连接成一个闭合的蒸发系统。给水经给水泵流入省煤器，受

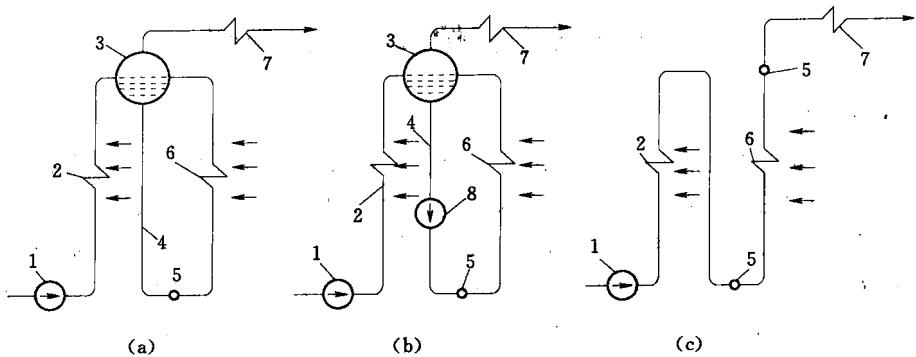


图 1-4 蒸发受热面中工质流动的方式

(a) 自然循环；(b) 控制循环；(c) 直流锅炉

1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—水冷壁下集箱；
6—水冷壁（蒸发管）；7—过热器；8—循环泵

热后进入蒸发系统。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，所以在下集箱的两侧有不平衡的压力差，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过热，而分离出来的水与进入汽包的给水混合，流入下降管重新循环。这种循环流动是由于下降管与蒸发管内工质的密度差而形成，所以称为自然循环。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，主要区别在于它在下降汇总管上设置了循环泵，以增强工质循环流动的推动力。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。

汽包锅炉只适用于临界压力以下的工作压力。

直流锅炉如图 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。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的压头来克服的。直流锅炉既可设计为超临界压力，也可设计为临界压力以下。

随着超临界压力锅炉的发展以及炉膛热强度的提高，又发展起来一种新的锅炉形式，即所谓的复合循环锅炉。复合循环锅炉是由直流锅炉和控制循环锅炉发展而来的，是在一台锅炉上同时具有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，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。

6. 其他分类方式

- (1) 按燃料类型分类。燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、生物质锅炉和余热锅炉等。
- (2) 按传热方式分类。锅壳式锅炉、火管锅炉、水火管锅炉和水管锅炉。
- (3) 按装配方式分类。快装锅炉、组装锅炉和散装锅炉。

第四节 典型锅炉基本结构介绍

一、燃油（燃气）锅炉

如图 1-5 所示为燃油或燃气的卧式火管锅炉，在卧置的锅筒内有一具有弹性的波形火筒。锅筒左、右侧及火筒上部都布置了烟管；火筒和烟管都沉浸在锅筒内的水容积里，锅炉的上部约 1/3 空间是汽容积，火筒内壁是主要辐射受热面，而烟管为对流受热面。

烟气在锅炉内呈 3 个回程流动，所以也称三回程锅炉。燃烧后的烟气在火筒内反向流动，为烟气第一回程；烟气经后烟箱导入左、右侧烟管，向炉前流动，为烟气第二回程；烟气至前烟箱汇集后，进入火筒上部的烟管向后流动，为烟气第三回程；最后经省煤器由引风机排入烟囱。

炉膛内为微正压燃烧（约 2000Pa），锅炉可不用引风机。

卧式火管锅炉在炉膛前部，通常用耐火材料砌筑拱旋，以达到蓄热、稳定燃烧和增强辐射的目的。

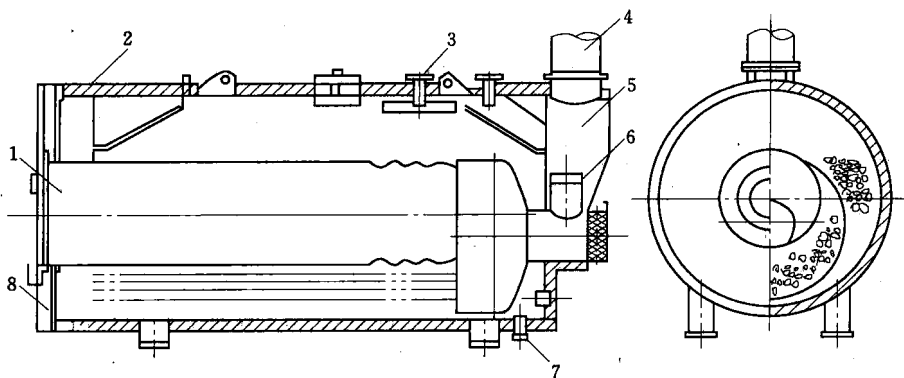


图 1-5 燃油或燃气的卧式火管锅炉

1—锅筒；2—前烟箱；3—蒸汽出口；4—烟囱；5—后烟箱；6—防爆门；
7—排污管；8—热风道

二、链条炉排锅炉

如图 1-6 所示为 SHL20-1.3-A 型锅炉，锅炉以煤为燃料。它采用链条式炉排，由液压传动机构驱动和调节。炉膛的内壁布满了水冷壁管，以充分利用辐射换热。炉膛后墙上部的烟气出口烟窗，水冷壁管被拉稀，形成防渣管。

煤经链条炉排输送到炉膛内燃烧。高温烟气穿过后墙上方的防渣管进入第一组锅炉管束，转 180°再冲刷第二组对流管束，然后经省煤器、空气预热器离开锅炉本体。

三、抛煤机链条炉

如图 1-7 所示为抛煤机链条炉。采用机械抛煤机，在炉子前墙布置抛煤机，将煤自前而后地均匀抛撒在倒转链条炉排上燃烧。与链条炉相比，由于抛煤机链条炉的着火条件优越，及其火床上方空间的气体成分变化情况比较均匀，采用无拱的开式炉膛；抛煤机使

烟气中飞灰较多，为此，抛煤机链条炉的炉膛比链条炉炉膛高一些。

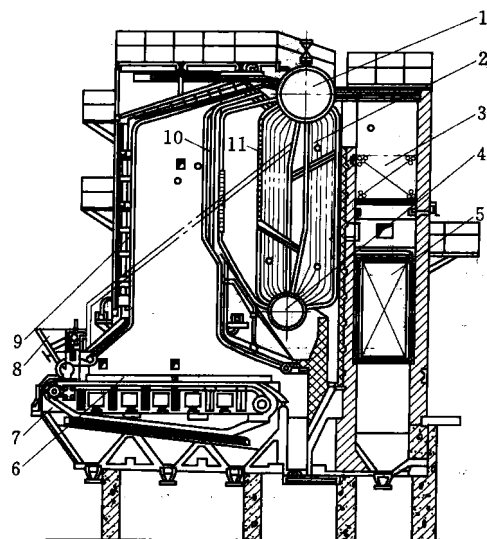


图 1-6 SHL20-2.5/400-A 型锅炉

1—上汽包；2—锅炉管束；3—省煤器；4—下锅筒；
5—空气预热器；6—水冷壁下集箱；7—链条炉排；
8—煤斗；9—水冷壁；10—防渣管；11—烟气隔墙

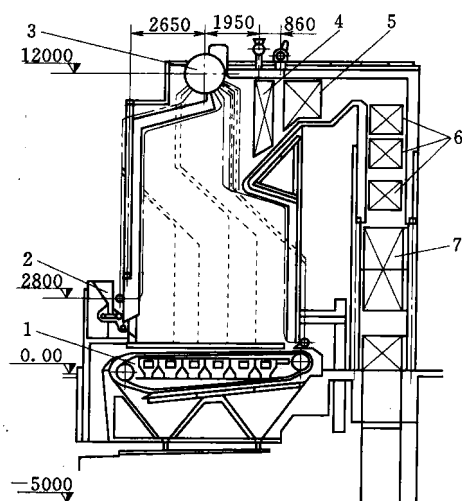


图 1-7 抛煤机链条炉

1—链条炉排；2—机械抛煤机；3—汽包；
4—高温段过热器；5—低温段过热器；
6—省煤器；7—空气预热器

这种锅炉容量通常为 35~75t/h，采用中温中压（包括次高压）。在 20 世纪 80~90 年代，广泛用于供热电厂。对于 65~75t/h 容量的锅炉，可配以 12MW 冷凝式汽轮发电机组或 6MW 背压式汽轮发电机组。

四、流化床锅炉

图 1-8 所示为 SHF4-1.3-S 型锅炉，它设置了沸腾燃烧装置，燃用 0~8mm 的石煤、煤矸石一类的低发热量燃料。

锅炉本体由沸腾床、悬浮段、上下锅筒间的对流管束及铸铁省煤器组成。锅炉微正压给煤，经可调速皮带给煤机连续输入沸腾床，灰渣则从溢流口溢出，为减少溢流出来的灰渣的热物理损失，锅炉还置有与沸腾床串联的二次沸腾冷却室。从溢流口溢出的灰渣经二次沸腾冷却室吸热冷却，灰渣温度可从 900℃ 降至 300℃ 左右，这不仅提高了锅炉热效率，而且改善了出渣环境和操作条件。

五、循环流化床锅炉

图 1-9 所示为典型电站用循环流化床直

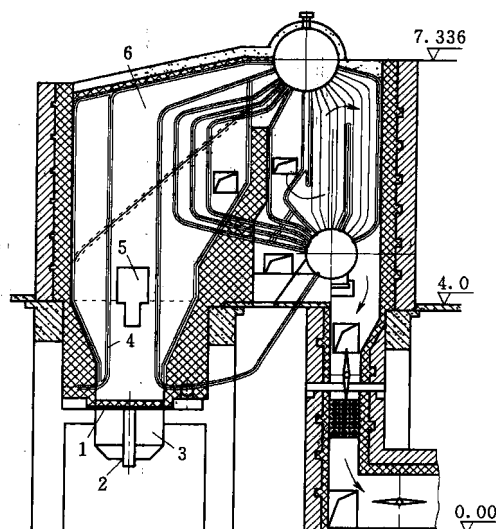


图 1-8 SHF4-1.3-S 型锅炉

1—布风板；2—放渣管；3—风室；4—烟管
受热面；5—溢流口；6—悬浮段

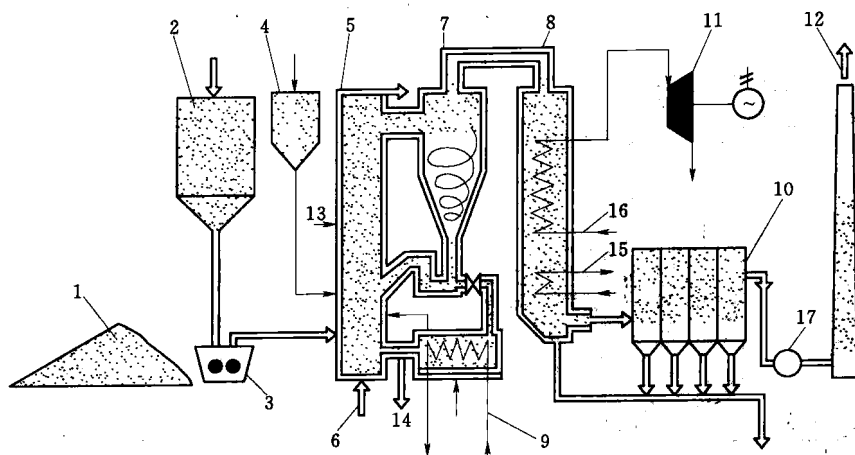


图 1-9 典型电站用循环流化床直流锅炉工作系统

- 1—煤场；2—煤料仓；3—燃料破碎机；4—石灰石仓；5—水冷壁；6—布风板底下的空气入口；
7—旋风分离器；8—锅炉尾部烟道；9—外置式换热器的被加热工质入口；10—布袋
除尘器；11—汽轮机发电机组；12—烟囱；13—二次空气入口；14—排渣管；
15—省煤器；16—过热器；17—引风机

流锅炉的工作系统，其基本工作过程如下：煤由煤场经抓斗和运煤皮带等传输并加入燃料

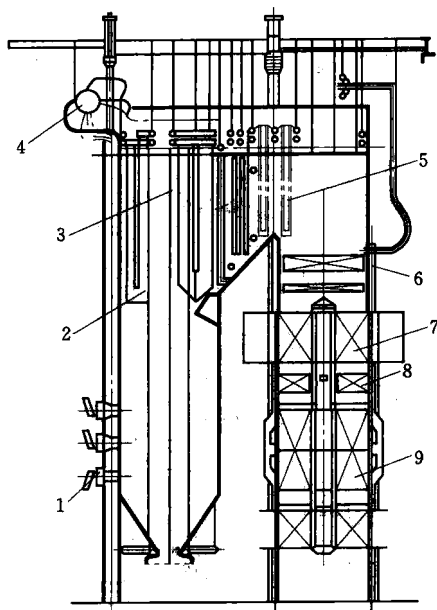


图 1-10 超高压再热煤粉锅炉

- 1—燃烧器；2—屏式过热器；3—水冷壁管；
4—汽包；5—对流过热器；6—再热器；7—空
气预热器（高温段）；8—省煤器；
9—空气预热器（低温段）

仓，然后由燃料仓进入煤破碎机被破碎成粒径小于 6mm 的煤粒后加入炉膛。与此同时，用于燃烧脱硫的脱硫剂石灰石也由石灰石仓加入炉膛，参与煤粒燃烧反应过程。炉内温度因受脱硫最佳温度的限制，一般保持在 850°C 左右。此后，随烟气流出炉膛的大量颗粒在旋风分离器中与烟气分离。分离出来的颗粒可以直接回入炉膛，也可经外置式换热器进入炉膛再次参与燃烧过程。由旋风分离器分离出来的烟气则被引入锅炉尾部烟道，对布置在尾部烟道中的过热器、省煤器和空气预热器中的工质加热后经除尘器除尘后，由引风机排入烟囱，流入大气。

在汽水系统方面，给水由给水泵压入省煤器吸热后流入布置在炉膛四周的水冷壁。工质在水冷壁中吸热汽化后流入位于对流烟道的过热器，并在其中进一步被烟气加热到规定的过热蒸汽温度和过热蒸汽压力。随后，过热蒸汽流入汽轮发电机组推动汽轮机带动发电机组发电。

外置式换热器中的被加热工质可以是给水或蒸汽。这些工质在外置式换热器中吸热后仍回入锅炉

的汽水系统。

燃烧及布风需要的一次风和二次风通常由冷空气在空气预热器（布置在后部烟道的省煤器后面，图中未示出）中预热后分别从炉膛底部及炉膛侧墙送入。

六、煤粉锅炉

如图 1-10 所示为采用再热的超高压煤粉锅炉。锅炉为传统的倒 U 形布置。锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内进行悬浮燃烧。炉膛周围布置大量水冷壁管，炉膛上部布置着顶棚过热器及屏式过热器等受热面。水冷壁和顶棚过热器等是炉膛的辐射受热面，其受热面管内有水和蒸汽流过，既能吸收炉膛的辐射热，使火焰温度降低，又能保护炉墙不致被烧坏。

高温烟气经炉膛上部出口离开炉膛进入水平烟道，然后再向下流动进入垂直烟道。在锅炉本体的烟道内布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等受热面。烟气在流过这些受热面时以对流换热为主的方式将热量传递给工质，这些受热面称为对流受热面。过热器和再热器主要布置于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中，故称为低温受热面或尾部受热面。

第五节 锅炉技术的发展

一、锅炉技术史

锅炉技术的发展是与生产技术的进步和工艺生产的发展紧密联系在一起的。理论基础的出现和发展（如热力学、传热学、流体力学、自动控制及理论）为锅炉技术的发展提供了科学依据。生产技术（如铆接、焊接、探伤等技术）以及冶金、化工等生产的发展为锅炉技术发展提供了加工制造、材料的供给和水处理服务的可能性。

锅炉从诞生到现有 200 多年的历史，最原始的锅炉是用铜制成的圆球形锅炉。后来在圆球形锅炉的基础上首先制造了圆筒形锅炉，以后随着工业的发展和需要，锅炉的结构形式不断得到改进和发展。这种改进和发展主要是从两个方向进行的，即火管方向和水管方向，如图 1-11 所示。

第一个发展阶段的锅壳锅炉又称火管锅炉，火管锅炉的特点在于水在火外，即管外壁与锅壳间流动的是水，管内流动的则是烟气或火焰，都有一个大直径的锅筒，所以锅炉的承压能力受限，因此使蒸汽参数受限；又由于它的燃烧室是布置在大锅壳内，属于内燃式，使燃烧空间受限，所以蒸发量难以增大。

最初的水管锅炉为水筒式锅炉，以后筒径进一步减小，真正意义上的水管锅炉才出现。水管锅炉开始是整体联箱式，由于联箱大，强度差，后来又改为波浪形分联箱水管锅炉，这样弹性和受力得到了改善。这种锅炉水管都是横置，不利于水循环，于是又出现了竖水管锅炉，但它依然是直水管锅炉，水管与锅筒连接的数量受限，于是又出现了弯水管锅炉，由于锅筒越多，与之连接的弯水管数量也越多，这样可以增加受热面，增大出力。随着辐射传热理论的出现，炉内增加了辐射受热面，对流受热面相对减少，于是又减少锅筒的数量，直至单锅筒锅炉。