

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



HUODIANCHANG
DONGLI SHEBEI

火电厂 动力设备

刘蓉莉 主 编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



HUODIANCHANG
DONGLI SHEBEI
**火电厂
动力设备**

主 编 刘蓉莉
编 写 李 京 谭德见
主 审 卢啸风



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

全书共分八章，主要包括：锅炉燃料及其燃烧设备、锅炉受热面、锅炉运行、汽轮机概述、汽轮机本体结构及其主要辅助设备、汽轮机运行、发电厂的热经济性、发电厂的热力及辅助生产系统等。

本书可以作为电力技术类及非热动力专业教学用书，也可作为电厂人员职业技能培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂动力设备/刘蓉莉主编. —北京：中国电力出版社，
2007

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-5570-2

I. 火... II. 刘... III. 火电厂—动力装置—高等学校：
技术学校—教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 080266 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>)
北京丰源印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 251 千字
印数 0001—3000 册 定价 16.80 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书共分八章，全面介绍了火力发电厂动力部分的锅炉、汽轮机及其热力系统。本书内容注重以实用为主，以必须、够用为度，追求新知识、新技术的应用。深浅适度、简明扼要、分量合适。

全书由重庆市电力公司教育培训中心刘蓉莉、李京、谭德见编写。刘蓉莉任主编，负责全书的统稿工作，并编写绪论、第一章~第三章；李京编写第四章~第六章；谭德见编写第七章、第八章。

本书由重庆大学卢啸风教授主审。卢啸风教授详细审阅了全部书稿，提出了许多建设性意见和建议，使编者在修改过程中受益匪浅，特此表示感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编者

2007年3月

目 录

前言

绪论	1
第一章 锅炉燃料及其燃烧设备	6
第一节 电厂锅炉概述	6
第二节 燃料特性	9
第三节 煤粉及制粉系统	12
第四节 煤的燃烧及燃烧设备	23
第五节 锅炉热平衡	34
思考题	36
第二章 锅炉受热面	37
第一节 蒸发设备	37
第二节 蒸汽净化设备	42
第三节 过热器和再热器	46
第四节 省煤器和空气预热器	48
第五节 典型锅炉简介	52
思考题	57
第三章 锅炉运行	59
第一节 锅炉启动和停运	59
第二节 锅炉的运行调节	62
思考题	66
第四章 汽轮机概述	67
第一节 汽轮机设备的组成及工作概况	67
第二节 汽轮机的工作原理及基本形式	68
第三节 汽轮机的分类和型号	72
第四节 汽轮机级的一般概念	74
第五节 汽轮机级内的工作过程	76
第六节 级内损失和级效率	79
第七节 多级汽轮机的轴向推力及其平衡	84
第八节 汽轮发电机组的效率和经济指标	86
思考题	87
第五章 汽轮机本体结构及其主要辅助设备	88
第一节 汽缸的结构和热膨胀	88
第二节 喷嘴组及隔板的结构	95

第三节 汽封	99
第四节 动叶片	102
第五节 转子	105
第六节 凝汽设备	109
思考题	112
第六章 汽轮机运行	113
第一节 汽轮机启停时的热状态	113
第二节 汽轮机的启动	115
第三节 汽轮机停机	116
第四节 汽轮机正常运行与监督	117
第五节 汽轮机的调节与保护	121
思考题	126
第七章 发电厂的热经济性	127
第一节 凝汽式发电厂的各种热损失和效率	127
第二节 提高热力发电厂热经济性的主要途径	129
第三节 热力发电厂的主要经济指标	135
思考题	136
第八章 发电厂的热力及辅助生产系统	137
第一节 原则性热力系统	137
第二节 给水回热加热系统	138
第三节 给水除氧系统	147
第四节 发电厂其他热力系统	153
第五节 火电厂的辅助生产系统简介	156
思考题	159
参考文献	160

绪 论

一、电力工业在国民经济中的作用及发展政策

（一）电力工业在国民经济中的作用

电能由于其固有的优点而成为国民经济各领域最广泛使用的能量。电力工业是把一次能源转变为电能的生产行业。一次能源是指以原始状态存在于自然界中，不需要经过加工或转换过程就可直接提供热、光或动力的能源，如石油、煤炭、天然气、水力、原子能、风能、地热能、海洋能等，上述前五种能源是当前被广泛使用的，所以称为常规能源，世界能源消费几乎全靠这五大能源来供应。一次能源通过加工、转化生成的能源称为二次能源。电能是优质的二次能源。一些不宜或不便于直接利用的一次能源（如核能、水能、低热值燃料等），可以通过转换成电能而得到充分利用，由此扩大了一次能源的应用范围。电能可较为方便地转换为社会所需要的各种形式的能源，如机械能、光能、磁能、化学能等，而且转换效率高。电能容易控制，无污染。以电能作为动力，可有效地提高各行各业的生产自动化水平，促进技术进步，从而提高劳动生产率，改善劳动者的工作环境和条件。电能能在提高人民的物质文化水平方面同样起着非常重要的作用。电能的应用已深入到社会生产和生活的各个领域，一个国家的电气化程度已成为国民经济现代化的一个重要标志。只有电力工业迅速发展才有可能保证整个国民经济迅速而稳步地发展。

（二）我国电力工业发展政策

我国的电力工业虽然取得了一定的成就，但与发达国家相比还有较大的差距。为缩小与发达国家的差距，促进我国电力工业持续、快速、健康地发展，国家提出了今后一个时期电力工业发展的政策。

（1）调整产业结构，优化资源配置。因地制宜地确定与地区经济发展相适应的电力工业发展速度。优先开发中西部地区的能源资源，加快坑口电厂建设，变输煤为输电。坚持优化发展火电、优先发展水电、适当发展核电、积极利用新能源的方针。大力发展大容量、高参数、高效率机组，重点建设 600MW 及其以上亚临界和超临界压力机组，逐渐淘汰小机组。重视有调峰能力电厂的建设，特别是加快东部地区抽水蓄能电站的建设。

（2）切实加强电网建设，积极推进全国联网。加强主干网的建设，提高输电线路的输送能力和供电质量，充分发挥和提高大电网的整体优势和效益。

（3）依靠科技进步，加快技术改造。对于国际上先进实用的技术，有重点、有选择地引进、吸收、创新，加速实现国产化。对于老电厂，通过技术改造实现节能降耗，提高电力工业的总体技术水平和安全经济运行水平。

（4）高度重视节约与环保。坚持资源开发和节约并重，把节约放在首位，提高能源利用率。加快循环流化床锅炉和脱硫设备的国产化步伐。加强对火电厂污染的治理，使火电厂的排放达到环保标准。

（5）进一步深化改革用电管理体制。厂网分开，建立起规范、竞争、有序的电力市场。

早日实现全国联网，统一调度，实现全国城乡电网电力销售同网同质同价。

二、电力生产的特点及基本要求

目前电能不能大量储存。这就要求发电厂所发出的电功率必须随时与用户所消耗的电功率保持平衡，以保证用户对电量的需求。为此，发电设备的运行工况必须随着外界负荷的变化而改变。根据这一特点，对电能生产提出了如下要求。

1. 安全可靠

电力工业是连续进行的现代化大生产，一个小事故处理不当就可能造成大面积的停电事故。所以电力生产必须保证发电和供电的可靠性与安全性。电力系统有必须的备用容量，以备在检修或事故情况下向外正常供电，对重要用户还要采用双回路供电。

2. 力求经济

目前，我国的电力生产仍以火电为主，所消耗的一次能源多，而能源的利用率又很低（仅为 30%），先进国家在 40%~50%，因此节能的潜力很大。如果发电煤耗平均下降 1g/(kW·h)，按目前的发电量计算，则全年可节约标准煤上亿千克；若全国送电线损率和厂用电率降低 1%，则全国可节电上百亿千瓦时。因此，在电力生产过程中，必须力求经济运行，提高能源利用率。

3. 保证电能质量

随着电力工业的不断发展，电网愈来愈大，为保证电能质量，在电力系统中设有适应用户有功功率变化的调频厂或机组，使电网频率保持在规定的范围内。为了保证电压质量，在电网中无功功率差异较大的局部地区要安装电力电容器或调相机组，给予补偿。

4. 控制污染与保护环境

火电厂在生产过程中产生的烟尘、SO_x、NO_x、废水、灰渣和噪声等，污染环境，危害人民的身体健康，必须采取有效措施严格控制。目前采用煤或烟气的脱硫、脱硝，流化床及低温分段燃烧等技术，使烟气中有害气体的含量得到有效控制；利用高效的电气式除尘器使烟气中的粉尘含量大为减少。可以说，火电厂环保的优劣已成为一个国家电力工业技术水平高低的标志之一。

三、电厂的类型

（一）按产品分

电厂按产品可分为发电厂和热电厂两种。发电厂只生产电能，如火力发电厂，汽轮机做完功的蒸汽，排入凝汽器凝结成水，所以又称为凝汽式发电厂。热电厂既生产电能又对外供热，供热是利用汽轮机较高压力的排汽或可调节抽汽送给热用户。

（二）按使用的能源分

1. 火力发电厂

以煤、油、天然气为燃料的电厂称为火力发电厂，简称火电厂。按照我国的能源政策，火电厂要以燃煤为主，并且优先使用劣质煤，除国家批准的燃油电厂外，严格控制电厂使用燃油。

2. 水力发电厂

以水能作为动力发电的电厂为水力发电厂。其生产过程是由拦河坝维持的高水位的水，经压力水管进入水轮机推动转子旋转，将水能转变成机械能，水轮机带动发电机旋转，从而使机械能转变为电能。

与火力发电相比,水力发电具有发电成本低、效率高、环境污染小、启停快、事故应变能力等优点,但需要修筑大坝,投资大、工期长。我国的水力资源丰富,从长远利益看,发展水电将取得很好的综合效益。

3. 原子能发电厂

将原子核裂变释放出的能量转变成电能的电厂为原子能发电厂,简称核电站。原子能发电厂由两部分组成:一部分是利用核能产生蒸汽的核岛,它包括核反应堆和一回路系统,核燃料在反应堆中进行链式裂变产生热能,一回路中冷却水吸收裂变产生的热能后流出反应堆,进入蒸汽发生器将热量传给二回路中的水,使之变成蒸汽;另一部分是利用蒸汽热能转换成电能的常规岛,它包括汽轮发电机组及其系统,与火电厂中的汽轮发电机组大同小异。

原子能发电比火力发电有许多优越性,其燃料能量高度密集,避免燃料的繁重运输,运行费用低,无大气污染等,但基建投资大。在能源短缺的今天,原子能发电将会得到更大的发展。

(三) 其他类型的发电厂

1. 燃气—蒸汽联合循环发电厂

利用燃气—蒸汽联合循环动力装置,能充分利用燃气轮机的余热发电,因此热效率高,净效率可达43.2%。利用深层煤炭地下气化技术,结合燃气—蒸汽联合循环发电,不仅能提高发电效率,而且避免深井煤炭的开采,有利于煤的脱硫,其综合效益将是非常显著的。当利用工业企业排放出的废气,如煤气厂、石化厂的火炬气、高炉烟气作为燃气轮机的能源时,还可减轻公害。

2. 抽水蓄能电厂

将电力系统负荷处于低谷时的多余电能转换为水的势能,在电力系统负荷处于高峰时又将水的势能转换为电能的电厂称为抽水蓄能电厂,或称抽水蓄能电站。这种水电站因有两次水的势能与电能之间的转换,所以存在一定的能量损失。但随着电力负荷的急剧增长,特别是对有大型核电站带基本负荷的电力系统,它在电力系统调峰、调频中的作用会更为显著,因而发展较快。

3. 太阳能发电厂

利用太阳能发电的电厂称为太阳能发电厂。太阳能发电有两种基本方法:一种是将太阳光聚集到一个容器上,加热水或其他低沸点液体产生蒸汽,带动汽轮发电机组发电;另一种是用光电池直接发电。

4. 地热发电厂

地热发电厂利用地下热水(蒸汽或汽水混合物),经过扩容器降压产生蒸汽,或通过热交换器使低沸点液体产生蒸汽,通过汽轮发电机组发电。

5. 风力发电厂

利用高速流动的空气即风力,驱动风车转动,从而带动发电机发电的电厂,称为风力发电厂。

另外,还有利用潮汐能、海洋能、磁流体等发电的电厂。

四、火力发电厂的生产过程

火力发电厂的生产过程,就是将燃料中的化学能转换为热能(在锅炉中),再将热能转

换为机械能（在汽轮机中），最后将机械能转换为电能（在发电机中）的一系列能量转换过程。

图 0-1 是以煤为燃料的火力发电厂生产过程示意图。煤由煤场经输煤皮带送入原煤仓，再与由锅炉尾部空气预热器来的热空气一起送入磨煤机，经过磨煤机被磨制成煤粉。风粉混合物由排粉风机送入锅炉燃烧室内燃烧，生成高温烟气，使燃料的化学能转换为烟气的热能。锅炉受热面将烟气的热能传给水。被冷却了的烟气通过尾部受热面，经除尘器，由引风机排入烟囱。

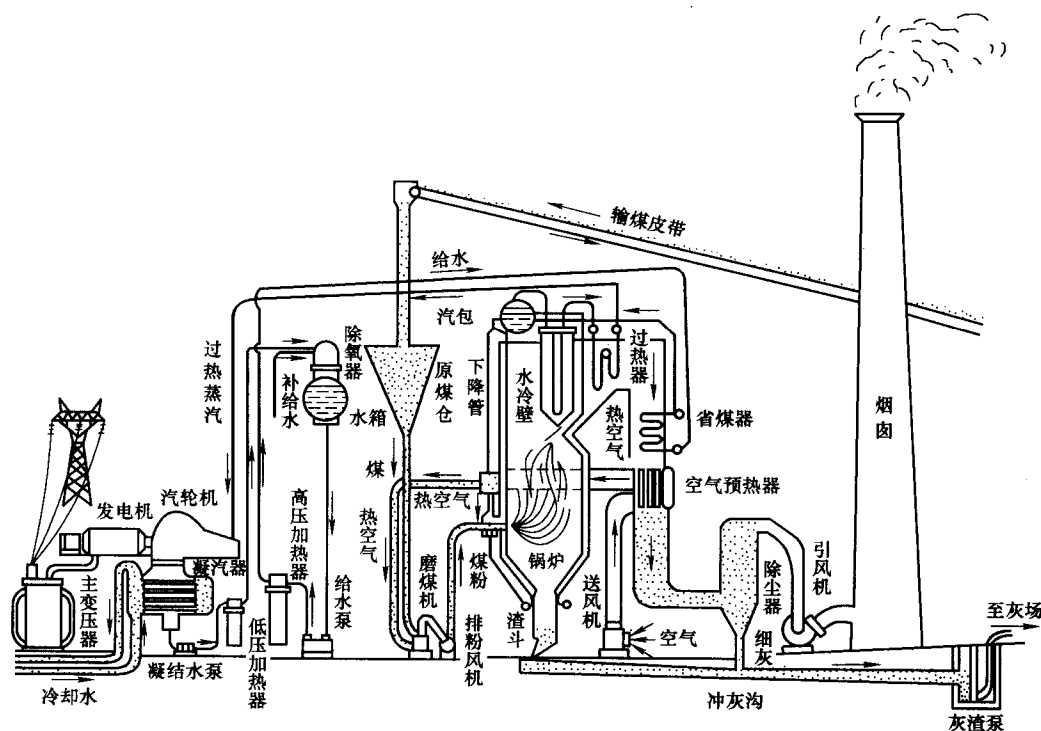


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图

给水进入锅炉，先经省煤器加热，再进入汽包。汽包出来的水经过下降管到锅炉的下联箱，再进入炉膛内的水冷壁，吸热汽化。汽水混合物又回到汽包，经汽水分离后，蒸汽进入过热器。在过热器中被加热成过热蒸汽后送往汽轮机。

过热蒸汽进入汽轮机，在汽轮机喷管中降压降温膨胀而形成高速气流，将蒸汽的热能转换成动能。具有较大动能的蒸汽冲动汽轮机转子上的叶片，使汽轮机转子旋转，将蒸汽的动能转换成汽轮机轴的回转机械能。汽轮机再带动发电机一起旋转而发出电能。

进入汽轮机的部分蒸汽从中间抽出，送至高压加热器、除氧器和低压加热器去加热凝结水和给水。其余大部分蒸汽在汽轮机中做功后变成乏汽，由汽轮机排入凝汽器，被循环水冷却而凝结成水。凝结水由凝结水泵抽出，经过低压加热器至除氧器。除氧后由给水泵经过高压加热器送回锅炉。如此周而复始，就使燃料燃烧时放出的热能连续不断地转换为电能。

由此可见，火力发电厂主要由两大部分组成，即从燃料的化学能转换为机械能的热力部

分和从机械能转换为电能的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机、水泵、加热器以及连接它们的管道等设备，这些设备的组合通常称为热能动力设备。

火力发电机组按汽轮机的进汽参数分为中低压机组（进汽压力 $<3.43\text{MPa}$ ）、高压机组（进汽压力为 8.83MPa ）、超高压机组（进汽压力 $12.75\sim13.24\text{MPa}$ ）、亚临界压力机组（进汽压力约为 16.17MPa ）、超临界压力机组（进汽压力约为 24.2MPa ）。

本书主要介绍火力发电厂的生产过程及动力设备。

第一章 锅炉燃料及其燃烧设备

第一节 电厂锅炉概述

一、锅炉的作用及工作过程

锅炉设备是火力发电厂三大主要设备之一，它是能量转换设备。其作用是使燃料释放热能，并将送入锅炉的给水加热成符合规定参数（温度、压力）和足够数量的蒸汽，供汽轮机使用。

从安全性来看：火力发电厂的生产过程是连续工作的，无论是入炉煤质发生变化，还是电网负荷发生变化，都要求锅炉能够立即自动适应这种变化，并确保蒸汽参数和蒸汽品质。若锅炉发生事故，必将影响到整个电厂的生产过程。从经济性来看：由于火电厂锅炉容量大，燃料消耗多，其运行好坏对节约燃料、降低成本影响很大。因此，锅炉在火力发电厂中占有很重要的地位，要提高电厂的安全经济性，就必须注重提高锅炉的安全经济性。

电厂锅炉是一个结构复杂、具有较高技术水平的承压设备。它工作时需要不断地供水、通风、输入燃料、组织好燃烧，并排出燃烧后的烟气、灰渣等。锅炉运行时需要许多的辅助设备协同工作。所以，锅炉是锅炉机组的简称，它由锅炉本体和辅助设备组成。

根据燃烧方式的不同，锅炉可分为煤粉锅炉、流化床锅炉和层燃锅炉。不同的锅炉，其锅炉本体和辅助设备有较大的差异。

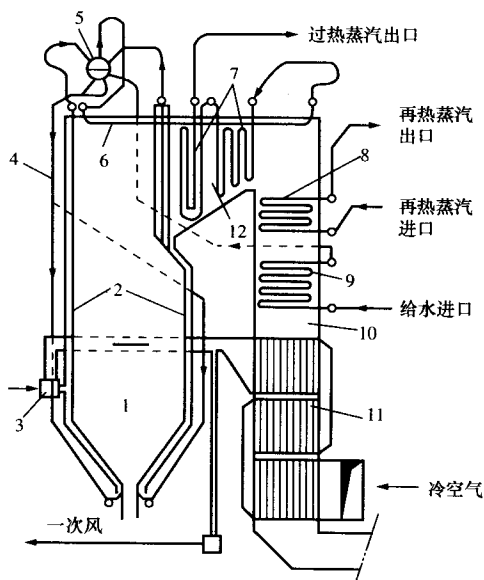


图 1-1 锅炉简化原理图

- 1—炉膛；2—水冷壁；3—燃烧器；4—下降管；
5—汽包；6—辐射式过热器；7—对流过热器；
8—再热器；9—省煤器；10—对流尾部烟道；
11—空气预热器；12—水平烟道

锅炉本体由炉膛、水平烟道和尾部烟道组成。

现以图 1-1 所示的一台煤粉锅炉简化原理图为例，介绍锅炉的工作过程。本书主要介绍煤粉锅炉及其辅助设备。

（一）燃烧系统

如图 1-1 所示，煤粉锅炉所燃烧的煤粉是由原煤经制粉系统制备而成的。煤粉和空气经燃烧器 3 送入炉膛，在炉膛空间 1 内悬浮燃烧。炉膛内侧布置着密集排列的管子，管内有水和蒸汽流动，这就是水冷壁 2，它吸收炉膛内的辐射热。煤粉燃烧放出热量，火焰中心具有 1500°C 或更高的温度。炉膛上部布置有顶棚过热器和屏式过热器，高温烟气在炉膛内流动时，主要以辐射换热方式把热量传递给水冷壁和过热器。烟气温度由此不断地降下来。

烟气离开炉膛后进入水平烟道 12，然后向下拐入垂直烟道 10。在水平烟道和垂直烟道中布置有过热器 7、再热器 8、省煤器 9、空气预热器 11 等受热面。烟气流过这些受热面时，主

要以对流换热方式放出热量，这些受热面称为对流受热面。过热器和再热器布置在烟温较高的区域，称为高温受热面。而省煤器和空气预热器布置在烟温较低的尾部烟道内，故称为低温受热面或尾部受热面。烟气流经这些受热面时，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）温度已很低，通常在 $110\sim 160^{\circ}\text{C}$ 之间。

以上与燃料燃烧有关的煤、风、烟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进行良好的燃烧。它由炉膛、燃烧器、空气预热器、通风设备（风机）及烟道、风道等组成。

燃烧系统的工作流程如图 1-2 所示。

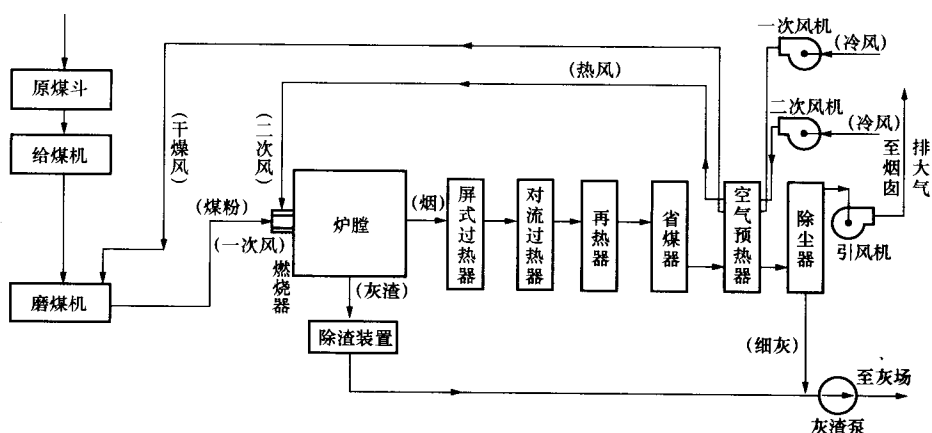


图 1-2 燃烧系统流程

(二) 汽水系统

在图 1-1 中, 锅炉的给水首先进入省煤器 9。省煤器是预热设备, 它利用烟气的热量使未饱和的给水预热升温。从省煤器出来的水送进汽包 5, 进入由汽包、下降管 4、水冷壁 2 组成的蒸发设备中。水在水冷壁中吸收高温火焰和烟气的辐射热, 被加热成饱和水, 并使部分水变成饱和蒸汽。汽水混合物又回到汽包, 并通过汽水分离装置, 将分离出来的水继续进入下降管循环, 分离出来的饱和蒸汽进入过热器 7。过热器是将饱和蒸汽继续加热的设备。从过热器出来的过热蒸汽, 通过主蒸汽管道进入汽轮机高压缸做功。

为了提高蒸汽动力循环的热效率和安全性，在锅炉压力为 13.7MPa 以上时，大多采用再热循环，这样锅炉汽水系统中还设有再热器。再热器是将汽轮机高压缸做过功，温度和压力都降低了的蒸汽，进一步加热升温的装置。从再热器出来的蒸汽又送回汽轮机中、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。它的主要任务是吸收烟气的热量，将水加热成规定压力和温度的过热蒸汽。对自然循环锅炉，它主要由省煤器、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、联箱等组成。

汽水系统的工作流程如图 1-3 所示。

在超临界压力锅炉中，由于已不存在汽水密度差，自然循环无法建立，因此采用强制循环。此时汽水系统中就没有汽包了。

火电厂锅炉机组是由锅炉本体和辅助系统组成的。辅助系统包括：燃料供应系统、煤粉制备系统、通风系统、除尘除灰系统、给水系统、水处理系统、测量及控制系统等。

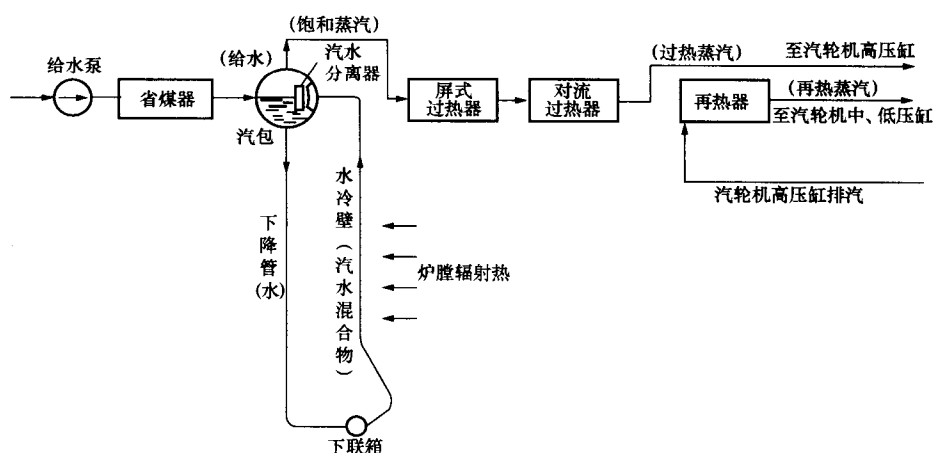


图 1-3 汽水系统流程

二、锅炉的主要特性参数

1. 锅炉容量

锅炉容量用蒸发量表示，是指锅炉在设计条件下每小时的最大连续蒸发量，简称 MCR，又称锅炉的额定容量或额定蒸发量，用符号 D_e 表示，单位为 t/h（或 kg/s）。习惯上，也用与之配套的汽轮发电机组的电功率表示，如 600MW 锅炉。

2. 锅炉蒸汽参数

锅炉蒸汽参数通常指按设计规定的锅炉出口处的蒸汽压力和温度。蒸汽压力用符号 p 表示，单位是 MPa，蒸汽温度用符号 t ，单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。当锅炉具有中间再热时，蒸汽参数还应包括再热蒸汽的压力和温度。

三、锅炉的分类及型号

1. 锅炉的分类

锅炉分类方法很多，常见的分类见表 1-1。我国电厂锅炉简况见表 1-2。

表 1-1 锅 炉 的 分 类

分类方法	锅 炉 类 型
按锅炉容量分	小型锅炉 ($D_e < 200\text{t/h}$)；中型锅炉 ($D_e = 220 \sim 410\text{t/h}$)；大型锅炉 ($D_e \geq 670\text{t/h}$)
按蒸汽压力分	中压锅炉 ($p = 3.8\text{MPa}$)；高压锅炉 ($p = 9.8\text{MPa}$)；超高压锅炉 ($p = 13.7\text{MPa}$)；亚临界压力锅炉 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$)；超临界压力锅炉 ($p \geq 22.1\text{MPa}$)
按燃用燃料分	燃煤炉；燃气炉；燃油炉
按燃烧方式分	层燃炉；室燃炉；旋风炉；流化床炉
按工质流动特性分	自然循环锅炉；强制流动锅炉（直流锅炉、控制循环锅炉、复合循环锅炉）

表 1-2 我国主要电厂锅炉简况

锅炉分类	蒸汽压力 (MPa)	过热/再热 蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	锅炉容量 (t/h)	配套机组 功率 (MW)
高压锅炉	9.8	540	215	220	50
		540		410	100

续表

锅炉分类	蒸汽压力 (MPa)	过热/再热 蒸汽温度 (°C)	给水温度 (°C)	锅炉容量 (t/h)	配套机组 功率 (MW)
超高压锅炉	13.7	555/555	240	400	125
		540/540		670	200
亚临界压力锅炉	18.3	540/540	278	1025	300
超临界压力锅炉	25.4	541/566	286	1900	600

2. 锅炉型号

锅炉型号是指锅炉产品的容量、参数、性能和规格。我国电厂锅炉型号常用四组字母表示，表达形式如下：

$$\triangle\triangle - \text{xxx} / \text{xxx} - \text{xxx} / \text{xxx} - \triangle \times$$

第一组符号是制造厂名称，用汉语拼音缩写表示，如 DG 表示东方锅炉厂，HG 表示哈尔滨锅炉厂，SG 表示上海锅炉厂；第二组数字中，分子表示锅炉容量，单位是 t/h，分母表示锅炉出口蒸汽压力，单位是 MPa；第三组数字中，分子和分母分别表示过热蒸汽温度和再热蒸汽温度，单位是 °C；最后一组中，符号表示燃料代号，数字表示锅炉设计序号，煤、油、气的燃料代号分别是 M、Y、Q，其他燃料的代号是 T。

例如：DG—1025/18.2—540/540—M2，表示东方锅炉厂制造，容量为 1025t/h，过热蒸汽压力为 18.2MPa，过热蒸汽温度为 540°C，再热蒸汽温度为 540°C，设计燃料为煤，第二次设计。

第二节 燃 料 特 性

通过燃烧可以产生热量的物质称为燃料。燃料的性质对锅炉工作的安全性和经济性有很大影响，是锅炉设计和运行的重要依据。因此，了解燃料的性质和特点是非常重要的。

燃料，按其状态可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。对于不同的燃料，要采用不同的燃烧方式和燃烧设备。从我国当前能源状况和能源政策看，电厂锅炉主要是烧煤。故本节着重介绍煤的特性。

一、煤的组成及其性质

煤的组成及各成分的性质，可按元素分析和工业分析两种方法进行研究。

1. 煤的元素分析成分

煤的元素分析成分，也称化学组成成分。它包括碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N)、硫 (S)、灰分 (A)、水分 (M) 等。各种成分的特点如下。

碳 (C) 是煤中主要可燃元素，其含量约为 40%~90%。1kg 碳完全燃烧约放出 32700kJ 的热量。煤中一部分碳与氢、氮、硫等结合成挥发性有机化合物，其燃点较低、易着火。其余部分呈单质状态，称为固定碳。固定碳不易着火，燃烧缓慢。因此，含碳量越高的煤，着火、燃烧就越困难。

氢 (H) 是煤中放热量最高的元素，其含量约为 3%~6%。1kg 氢燃烧生成水蒸气时可放出约 120×10^3 kJ 的热量。氢极易着火，燃烧迅速，因此含氢量多的煤容易着火。

硫 (S) 是煤中的可燃成分之一。煤中的硫以有机硫 (与碳、氢、氧等结合成化合物)、

黄铁矿硫（与铁元素组成的硫化铁）和硫酸盐硫（与钙、镁等元素组成的盐类）三种形态存在。前两种硫可以燃烧，后一种硫不能燃烧，并入灰分。硫的含量约为 1%~8%，1kg 硫燃烧放出 9050kJ 的热量。但燃烧生成的 SO_2 会对环境造成污染，并对锅炉产生腐蚀。因此硫是煤中的有害元素。

煤中的氧（O）和氮（N）是不可燃元素。一部分氧呈游离状态，能助燃；另一部分氧与碳、氢结合成化合状态，不能助燃。煤中含氧量多时，其可燃元素相对减少，煤的发热量将降低。煤中氧的含量变化较大，从 1%~2% 直至 40%。氮的含量在煤中很少，约为 0.5%~2%。在氧气供应充分，高温和含氧量高的燃烧过程中，易生成氮氧化物（ NO_x ），造成大气污染。

水分（M）是煤中主要杂质，也是一种有害成分。煤中水分由表面水分（外在水分）和固有水分（内在水分）组成。表面水分可以通过自然干燥除掉。固有水分利用自然干燥法不能去掉，必须将煤加热到一定温度后才能除掉。煤中水分含量差别很大，少的仅 2% 左右，多的可达到 50%~60%。煤中水分增加，使可燃成分含量相对减少，并且煤在燃烧时水分蒸发吸收热量，使煤的实际发热量降低。水分增多，会导致着火推迟，炉膛温度降低，燃烧不完全，增加排烟热损失和引风机电耗量，还可能减少磨煤机出力，造成制粉系统的堵塞。

灰分（A）是煤中完全燃烧后剩余的不可燃杂质。其含量一般为 10%~35%，劣质煤的灰分含量高达 60%~70%。煤中灰分量增加，可燃物质含量相对减少，使煤的发热量降低。在燃烧中灰分妨碍了可燃物质与氧的接触，增加煤着火和燃尽的困难，同时还使燃烧损失增大。多灰分的煤还会增加锅炉受热面积灰、结渣、磨损和腐蚀的可能性，并增大对环境的污染。显然，灰分是有害成分。

煤的元素分析方法比较复杂，电厂一般采用比较简单的工业分析。

2. 煤的工业分析成分

煤的工业分析是在规定条件下，对煤样进行干燥、加热和燃烧，在这一过程中分别测定煤相继失去的重量，即可得到水分（M）、挥发分（V）、固定碳（FC）和灰分（A）的含量。这些成分是煤在燃烧过程中分解的产物。因此，煤的工业分析成分更能表明煤的某些燃烧特性，它也是动力用煤的重要依据。

挥发分是煤在加热过程中，煤中有机质分解析出的气体物质，主要由 CO 、 H_2 、 H_2S 、 C_nH_m 等可燃气体组成，还含有少量 O_2 、 CO_2 、 N_2 等不可燃气体。因此挥发分的燃点低，使煤容易着火。挥发分析出后，燃料表面形成较多孔隙，增大了煤的燃烧面积，将加速煤的燃烧过程。挥发分多的煤较易于燃尽，能获得较高的燃烧效率；相反，挥发分较少的煤，着火困难，不易完全燃烧。因此，挥发分含量是对煤分类的重要依据。

需要指出的是，由于煤的分子结构极为复杂，光靠元素分析和工业分析，不能全面说明煤的基本燃烧特性。有时两种元素分析或工业分析成分相近的煤，其着火和燃烧特性可能存在较大差异。

3. 煤的成分分析基准

煤中的成分是以质量百分数表示的。测定煤的成分，往往取实际工作煤（即炉前煤）为分析样品，所测定出煤的成分含量一般用占样品的质量百分数表示，称为收到基，用下角标“ar”表示，即

$$\text{元素分析} \quad \text{C}_{\text{ar}} + \text{H}_{\text{ar}} + \text{O}_{\text{ar}} + \text{N}_{\text{ar}} + \text{S}_{\text{ar}} + \text{A}_{\text{ar}} + \text{M}_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-1)$$

$$\text{工业分析} \quad \text{FC}_{\text{ar}} + \text{V}_{\text{ar}} + \text{A}_{\text{ar}} + \text{M}_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-2)$$

以假想无水无灰状态的煤为基准分析而得的成分，称为干燥无灰基，用下角标“daf”表示，即

$$\text{元素分析} \quad \text{C}_{\text{daf}} + \text{H}_{\text{daf}} + \text{O}_{\text{daf}} + \text{N}_{\text{daf}} + \text{S}_{\text{daf}} = 100\% \quad (1-3)$$

$$\text{工业分析} \quad \text{FC}_{\text{daf}} + \text{V}_{\text{daf}} = 100\% \quad (1-4)$$

由于干燥无灰基成分不受水分、灰分含量的影响，比较稳定，因此，干燥无灰基更能准确地反映煤的特征。尤其是干燥无灰基挥发分的含量，能确切地反映煤燃烧的难易程度，是煤分类的一个重要指标。

图 1-4 示意出两种分析成分间的关系。

二、煤的主要特性指标

1. 发热量

发热量是煤的主要特性之一。通常采用每千克收到基燃料完全燃烧时所放出的热量 Q_{ar} 表示，单位为 kJ/kg。

煤的发热量有高位发热量和

低位发热量之分。高位发热量是指 1kg 煤完全燃烧所放出的热量，其中包括燃烧产物中的水蒸气凝结成水所放出的汽化潜热，用 $Q_{\text{ar,gr}}$ 表示。当发热量中不包括燃烧产物水蒸气的汽化潜热时，则称为低位发热量，用 $Q_{\text{ar,net}}$ 表示。锅炉运行中，排烟温度一般在 110~160℃ 之间，排烟中的水蒸气不可能凝结成水并放出汽化潜热。因此，实际能被锅炉利用的只是煤的低位发热量。我国锅炉技术中通常采用低位发热量作为热力计算的依据。

各种不同种类的煤发热量差别很大。当锅炉负荷不变，燃用低发热量的煤时，煤消耗量就大；燃用高发热量的煤时煤耗量就小。为了便于比较各发电厂或锅炉的经济性，便引入了标准煤的概念。

所谓标准煤是指收到基低位发热量为 29308 kJ/kg (7000 kcal/kg) 的煤。若实际煤的消耗量为 Bt/h，折合成标准煤的消耗量为 B_b ，即

$$B_b = \frac{BQ_{\text{ar,net}}}{29308} \quad (\text{t/h}) \quad (1-5)$$

2. 灰的性质

灰的性质主要是指它的熔融性，表现为煤中灰分熔点的高低。当炉内温度达到或超过灰分熔点时，固态的灰分将逐渐变成熔融状态。当它与受热面接触时，将黏附在受热面上，形成结渣（结焦），导致传热恶化，对锅炉的经济性、安全性都将造成影响。

灰的熔融特性一般用实验测定，通常采用角锥法。如图 1-5 所示，对灰锥加热过程中，根据灰锥的状态变化确定以下几个温度。



图 1-5 灰的熔融特性示意

变形温度 DT——灰锥顶端开始变圆或弯曲时的温度。

软化温度 ST——灰锥顶端弯曲至