

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电厂热力设备 及运行

盛 伟 肖增弘 合 编
牛卫东 孙文杰



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电厂热力设备 及运行

盛 伟 肖增弘 合 编
牛卫东 孙文杰
韩中合 主 审



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书讲述了火力发电厂热力设备的工作原理、结构、热力系统、热经济性、调节与保护以及单元机组运行的主要内容。全书共分四篇十二章，第一篇锅炉部分，第二篇汽轮机部分，第三篇火力发电厂辅助设备及系统，第四篇单元机组运行。

本书是为本科、高职高专非热能动力专业而编写的教材，同时也可作为其他相关专业师生或技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热力设备及运行/盛伟等编. —北京：中国电力出版社，2007.1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5010 - 3

I. 电... II. 盛... III. 火电厂—热力系统—高等学校—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 150346 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 3 月第一版 2007 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 455 千字 4 插页

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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

随着现代化电力工业的发展,大容量高参数发电机组越来越多,自动化水平不断提高,电厂对热工及其相关专业的师生或技术人员掌握本体设备的要求越来越高,为此,本书的内容从 300、600MW 机组的实际出发,力求简洁明了,使在校学生或现场的工程技术人员能更好的了解本体设备,以满足教学或企业技术人员提高业务水平的需要。

本书在讲授专业理论的同时,结合当今电力生产中常见的实际问题,做到既能为在校学生所用,也能为企业培训所用。

全书共分四篇十二章。其中,第一章~第三章由西安电力高等专科学校孙文杰编写,第四章~第六章由沈阳工程学院盛伟编写,第七章~第九章由沈阳工程学院肖增弘编写,第十章~第十二章由山东电力高等专科学校牛卫东编写,全书由盛伟统稿。

本书由华北电力大学能源与动力学院韩中合教授审阅。韩教授提出了很多宝贵的建议,使本书的内容更严谨。同时本书在编写过程中得到各兄弟院校及同行大力支持,在此一并表示感谢!

本书编写过程中由于时间较紧,且内容涉及面很广,因此,书中难免有不妥之处,殷切希望采用这本教材的兄弟院校老师和读者批评指正。谢谢!

编 者

2006 年 10 月

目 录

前言	
绪论	1

第一篇 锅炉部分

第一章 概述	6
第一节 电厂锅炉的工作过程及特性	6
第二节 锅炉的分类与型号	9
第三节 典型电厂锅炉介绍	13
第二章 锅炉的燃烧系统及其设备	16
第一节 燃料及燃烧	16
第二节 制粉系统及其设备	26
第三节 锅炉机组的热平衡	37
第四节 燃烧设备	40
第五节 辅助设备	49
第三章 锅炉的汽水系统及其设备	56
第一节 锅炉水循环	56
第二节 锅炉受热面	60
第三节 直流锅炉简介	74
第四节 锅炉水处理	78

第二篇 汽轮机部分

第四章 概述	82
第一节 汽轮机的基本原理	82
第二节 反动度及汽轮机级的分类	85
第三节 汽轮机分类	88
第五章 汽轮机工作原理	90
第一节 蒸汽在汽轮机级中的流动	90
第二节 多级汽轮机	101
第三节 汽轮机变工况	109
第六章 汽轮机本体结构	115
第一节 汽轮机转动部分	115
第二节 汽轮机静止部分	120
第七章 汽轮机调节系统	139
第一节 概述	139
第二节 液压调节系统的特性	144

第三节	数字式电液调节系统	155
第四节	危急遮断系统	165
第五节	汽轮机的供油系统	172

第三篇 火力发电厂辅助设备及系统

第八章	火力发电厂辅助设备及系统	181
第一节	凝汽设备及系统	181
第二节	给水回热加热设备及系统	190
第三节	除氧设备及系统	200
第四节	火力发电厂的原则性热力系统	204
第五节	火力发电厂的全面性热力系统	206
第九章	火力发电厂的经济性	217
第一节	凝汽式发电厂的热经济指标	217
第二节	原则性热力系统的计算	219

第四篇 单元机组运行

第十章	热力设备运行的基本知识	223
第一节	单元机组的构成及特点	223
第二节	锅炉的受热状态	224
第三节	汽轮机的受热状态	228
第十一章	单元机组运行	240
第一节	单元机组的启停	240
第二节	汽包炉单元机组冷态启动	242
第三节	直流炉单元机组启动	255
第四节	单元机组停运	258
第五节	单元机组调峰及变压运行	260
第十二章	单元机组事故处理	267
第一节	单元机组事故特点及处理原则	267
第二节	单元机组常见事故及其处理	268
第三节	单元机组事故事例	285
参考文献		290

绪 论

§ 0-1 能源利用及其在电力工业中的地位

在自然界中,蕴藏着极为丰富的能量,如风力、水力、燃料化学能、太阳能以及原子(核)能等等。按照物质运动形式之不同,能量可相应地分为机械能、热能、电能、化学能和辐射能等多种形式。物体在作机械运动时所具有的宏观能量(包括宏观动能及宏观势能)叫做“机械能”,而所谓热能则是指组成物质的所有微粒作各种不规则热运动时的总能量。

人类社会的发展,促使人们不断地开发和利用自然界的各种能源,其中以利用热能(主要由燃料中的化学能通过燃烧转变而来)最为广泛。人们利用热能一般有两种方式:一种是直接把热能用于加热、采暖、蒸煮或烘干等;另一种则是间接利用方式,即把热能转换为发动机转轴上的机械能,用作生产上的动力,或进一步将机械能转变为电能。

由于电能具备输送、使用方便,又易于转变成其他形式的能量等一系列优点,它已成为现代社会建设物质文明的重要条件。工农业生产和日常生活所需要的电能,都是由发电厂集中进行生产和供应的。电能可由自然界的各种能源转换而得到,其中以应用燃料资源和水力资源来发电占主要地位。原子能固然是巨大的能源,但由于原子能用于发电起步较晚,以致现阶段原子能发电量在全世界总发电量中所占的比重仍然不大;风力发电受到地理环境的限制很大,况且容量较小,又不易控制;至于太阳能发电、地热发电和潮汐发电等,目前它们的规模都还很小时,其应用场所亦受特定环境的限制。因此,就我国的电力工业发展情况而言,在今后相当长的时期内电能主要还是依靠火力(热力)发电厂和水电站来生产与供应。

热力发电和水力发电各有其特点,在电力工业中它们均占有重要的地位。水力发电毋需消耗燃料,发电成本较低,运行操作比较简单,但水电站工程浩大、投资多、建期长,布局和规模受自然条件的限制,其发电能力在枯水季节将大幅度减小;热力发电则要耗用大量燃料,发电成本较高,技术管理较为复杂,但具有投资较少、建期较短、布局和规模灵活、可以既供电又供热等许多优点。这就决定了热力发电在绝大多数国家的电力工业中均占有很大的比重。目前全世界的热力发电量约占总发电量的 75% 弱,在我国 2000 年占 81%。我国电力工业中热力发电所占比例较大,在今后的电力建设中热力发电量必然还会有很大的增长,因此,热力发电仍然是我国电力工业中生产电能的主要方式之一。

§ 0-2 我国电力工业的发展

我国的电力工业起步较晚,但发展速度很快。1949 年我国发电装机容量和发电量仅为 185 万 kW 和 43 亿 kWh,分别居世界第 21 位和第 25 位。新中国成立后,电力工业得到快速发展,1978 年发电装机容量达到 5712 万 kW,发电量达到 2566 亿 kW·h 时,分别跃居世界第 8 位和第 7 位。1978 年改革开放到 2000 年,我国发电装机和发电量先后超越法国、

英国、加拿大、德国、俄罗斯和日本,居世界第2位。1987年发电装机突破1亿kW,1995年超过了2亿kW,2000年跨上3亿kW台阶。进入新世纪,电力工业进入历史上的高速发展阶段,2004年全国发电装机突破4亿kW,2005年超过了5亿kW。

改革开放之前,我国发电设备只能生产12.5万kW和20万kW等级及以下的机组。随着电力工业的技术装备水平不断提高,我国成批量生产的30万kW和60万kW机组已成为国内的主力机型。目前,60万kW、90万kW超临界压力机组已经投产发电,国产百万千瓦级超超临界压力机组也即将投产。通过引进国际先进技术,国内合作生产的30万kW大型循环流化床锅炉发电设备、9F级联合循环燃气轮机、60万kW级压水堆核电站和70万kW三峡水轮机组等发电设备在性价比上已经具有了国际竞争力。但在百万千瓦级核电站的设备制造等方面同国际先进水平相比仍有一定差距。

近20多年来,特别是在近10年多时间里,中国电力工业得到全面的快速发展。我国连续跃过法国、英国、加拿大、德国、俄国、日本,从1996年开始就稳居世界第二,基本上扭转了长期困扰我国经济发展和人民生活需要的电力严重短缺局面。电力行业已实现电力供需基本平衡略有裕量的成就。在电力结构上,不断调整优化,技术装备水平不断提高,使中国电力工业进入了大机组、大电厂、大电网、超高压、自动化、信息化,水电、火电、核电、新能源发电全面发展的新时期。电网建设极大加强,电力调度水平不断提高,西电东送、南北互供、全国联网的格局已基本形成;科技水平得到提高,电力环境保护得以加强,使中国电力工业的科技水平与世界先进水平日渐接近;环境排放控制、生态保护日益加强,使电力发展的经济效益、社会效益与环境效益渐趋统一;电力管理水平和服务水平不断得到提高,电力发展的战略规划管理、生产运行管理、电力市场营销管理以及电力企业信息管理水平、优质服务水平等普遍得到提高;进一步扩大了对外开放,积极实施国际化战略,在利用外资、引进设备、引进技术、实施走出去战略都取得了巨大的成就;此外还不断提高了电力职工队伍素质,积极扩大了多种经营,不断深化电力企业改革,推动企业重组改造,加强了法制建设,走上了法制化管理的轨道,以及不断加强电力企业的精神文明建设和企业文化建设。

总之这20年,特别是最近10年,是中国电力工业发展历史上成就巨大的10年,是电力体制发生根本性变革的10年,是中国电力工业走向世界前沿的10年。可以预见并坚信,中国电力工业再用20年时间,在中国共产党第十六届代表大会提出“全面建设小康社会,开创中国特色社会主义事业新局面”的伟大旗帜指引下,中国的电力工业必将有更大规模的发展,技术管理水平有更大的提高,为全面建设小康社会,为中华民族的伟大复兴,为电力的可持续发展做出更大的贡献。

§ 0-3 发电厂的组成及其生产过程

火力发电厂主要使用汽轮机作为发动机。现代结构的汽轮机不仅机组的单机容量可高达1000MW以上,热效率较高,并且运行稳定,工作可靠。所以,现代中、大型火力发电厂都是汽轮机发电厂。我国的热力发电厂根据国家电力工业技术政策的规定,以燃煤为主。

图0-1为一座燃用煤粉的小型汽轮机发电厂的生产过程示意图。用火车或轮船运入发电厂贮煤场的煤,经过碎煤设备破碎后,由皮带运输机送入锅炉房内的原煤仓。煤从原煤仓

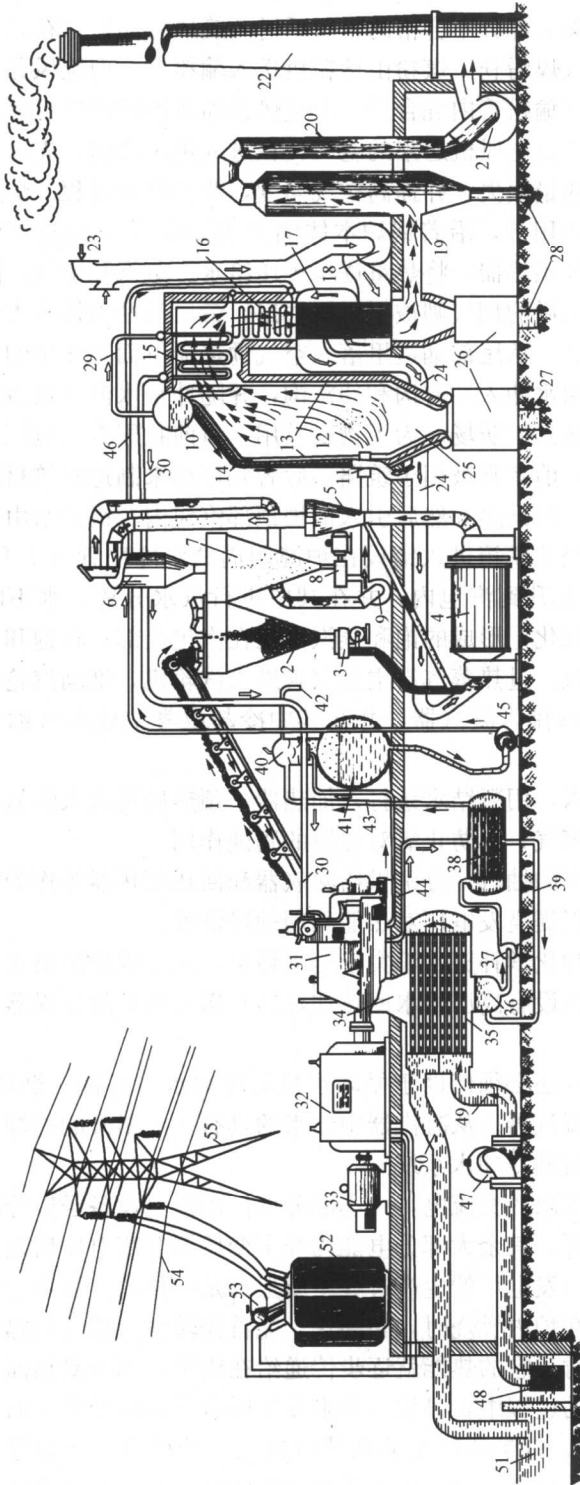


图 0-1 凝汽式发电厂的生产过程示意图

- 1—运煤皮带；2—原煤仓；3—圆盘给煤机；4—钢球磨煤机；5—粗粉分离器；6—旋风分离器；7—煤粉仓；8—给粉机；9—排粉机；10—汽包；11—喷燃器；12—烟道；13—水冷却壁；14—下降管；15—过热器；16—省煤器；17—空气预热器；18—送风机；19—除尘器；20—烟道；21—引风机；22—烟囱；23—送风机的吸风口；24—热风道；25—冷灰斗；26—除灰设备；27—冲渣沟；28—冲灰沟；29—引风机；30—主蒸汽管；31—汽轮机；32—发电机；33—励磁机；34—乏汽口；35—凝汽器；36—热井；37—凝汽器；38—低压同热加热装置；39—低加疏水管；40—除氧器；41—给水箱；42—化学补充水入口；43—汽轮机第一级抽汽；44—汽轮机第二级抽汽；45—给水泵；46—给水管；47—循环水泵；48—吸水滤网；49—冷却水进水管；50—冷却水出水管；51—江河或冷却水池；52—主变压器；53—油枕；54—高压输电线；55—铁塔

落入给煤机，由给煤机送入磨煤机，在其中研制成煤粉，同时送入热空气来干燥和输送煤粉。磨制好的煤粉，经粗粉分离器除去部分不合格的粗粉后进入旋风分离器，在其中空气和煤粉得以分离，分离出来的细粉进入煤粉仓。煤粉由给粉机送入输粉管，而旋风分离器中的空气则由排粉机抽出。煤粉和空气在输粉管内混合后，由喷燃器喷入炉膛内进行燃烧（也有直接把气粉混合物送入炉内燃烧的。由送风机送来的空气，在进入炉膛之前，先在空气预热器中接受排烟的预热，以减小排烟热量损失，并提高空气温度，改善燃烧过程。炉膛内的燃烧产物——高温烟气，在引风机的作用下，沿着锅炉本体倒 U 形烟道依次流过炉膛，过热器、省煤器（给水预热设备）和空气预热器，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气流入除尘器进行净化，净化除尘后的烟气则被引风机抽出，最后经烟囱排入大气。

燃料燃烧时从炉膛内落下的灰渣，从尾部烟道里落入空气预热器下面灰斗中的飞灰，以及除尘器收集下来的飞灰，通常都用水冲入冲渣沟和冲灰沟，并随冲灰水流往灰渣泵房，然后用灰渣泵、灰渣管等设备将其排送到贮灰场。为了物尽其用，目前我国有些电厂已将灰渣和除尘器所捕集到的飞灰加以利用，前者常被用于筑路，后者则可用来制造建筑材料。

锅炉给水先在省煤器中接受烟气的预热，然后引入锅炉顶部汽包内。锅炉水由于本身的重量沿炉膛外的下降管往下流动，经下联箱进入铺设在炉膛四周的水冷壁管（上升管），在其中吸热汽化，形成的汽水混合物上升到汽包内，并在其中进行汽水分离。水不断在下降管、水冷壁管及汽包内循环，不断汽化，形成的饱和蒸汽聚集在汽包上部；将饱和蒸汽引入过热器，使之继续加热变为过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管进入汽轮机，推动汽轮机转子转动，从而获得机械能。做功后的乏汽排入凝汽器，并在其中冷却成凝结成水（称为主凝结水）。

汇集在凝汽器热井中的主凝结水，用凝结水泵打入加热器，预热后再进入除氧器，在其中继续被加热并除去溶解于水中的氧气，以防止氧对金属的腐蚀作用。

从汽轮机某几个中间级后引出来的抽汽，分别供给除氧器和回热加热器等作为加热除氧以及预热给水之用，而预热给水可以提高发电厂对热能利用的经济性。

在除氧器里脱过氧的主凝结水和化学补充水汇集于给水箱中，成为锅炉的给水，借给水泵升压后，沿给水管路（大型电厂还设有高压给水回热加热器）送入锅炉的省煤器，以便继续使用。

为使乏汽在凝汽器内冷凝成水，还必须借助于循环水泵对冷却水（又称“循环水”）加压，并使其沿着冷却水进水管进入凝汽器。从凝汽器中出来的具有一定温升的冷却水则沿排水管路流回江河里，这就形成了汽轮机的冷却水系统。

发电机由汽轮机直接拖动，所发出的交流电，一小部分由厂用配电设备予以分配，作为厂房照明和各种辅助机械的厂用电源，其余大部分电能均经主变压器升高电压后送入电网。

从能量转换的角度来看，各热力发电厂的生产过程本质上都是一样的。因为它们的能量转换都是由燃料的燃烧开始，燃料在炉内燃烧时，它的化学能首先转变为烟气的热能；当烟气沿锅炉炉膛及其后面的烟道流过时，它的热能就逐步传递给在锅炉各部分受热面内流动的水、蒸汽以及空气（在此单纯传热的过程中，显然，并未发生能量形式的变化，而只不过是热能从一种介质传递给另一种介质）。锅炉所产生的新蒸汽进入汽轮机后逐级膨胀，蒸汽的部分热能就转变为汽流的动能；高速汽流施加作用力于汽轮机的叶片上，推动了叶轮连同整个转子旋转，汽流的动能于是被转换成汽轮机转轴上的机械能。汽轮机通过靠背轮（联轴

器)带动发电机转动,机械能则被转换成发电厂的产品——交流电。

由上述可见,现代热力发电厂的主要组成部分包括热力和电气两大部分,其中锅炉、汽轮机、发电机为发电厂的三大核心设备。

§ 0-4 本课程的任务与主要内容

如上所述,热力发电厂是由许多热力设备和电气设备所组成的一个非常复杂的整体,从某种意义上讲,热力部分的设备更多、更为复杂,也更容易发生故障和事故,热力部分和电气部分彼此间的关系是十分密切的。因此,凡从事电力工程方面工作的技术人员,都须对有关热力部分的基本知识有所了解,有所掌握。本课程的任务就在于研究和讨论:热力部分的组成,主要热力设备(锅炉和汽轮机)及其有关辅助设备的基本原理、构造特点以及重要性,DEH调节系统的组成和各主要组件的作用,单元机组的集中控制运行等内容。通过本课程的学习,要求学生能较全面地认识并了解发电厂主要热力设备的工作原理、基本构造、DEH调节原理和机组集控运行,并通过参观和生产实习等教学环节,对现代的中型和大型热力设备逐步建立起较为完整的概念。

为了达到以上要求,本课程的基本内容包括锅炉设备、汽轮机设备、DEH调节原理、热力系统以及单元机组集控运行等部分。

第一篇 锅 炉 部 分

第一章 概 述

第一节 电厂锅炉的工作过程及特性

一、电厂锅炉的作用及组成

电厂锅炉是火力发电厂三大主要设备中重要的能量转换设备。它的作用是将燃料的化学能转变为热能，并利用热能加热锅内的水使之成为具有足够数量和一定质量（汽温、汽压）的过热蒸汽，供汽轮机使用。现代火力发电厂的锅炉容量大、参数高、技术复杂、机械化和自动化水平高，所用燃料主要是煤，并且煤在燃烧之前先制成煤粉，然后送入锅炉在炉膛中燃烧放热。概括地说，锅炉的主要工作过程就是燃料的燃烧、热量的传递、水的加热与汽化和蒸汽的过热等。

（一）电厂锅炉设备的组成

图 1-1 是一台煤粉炉的主要设备示意图。整个锅炉设备由锅炉本体和辅助设备两部分组成。

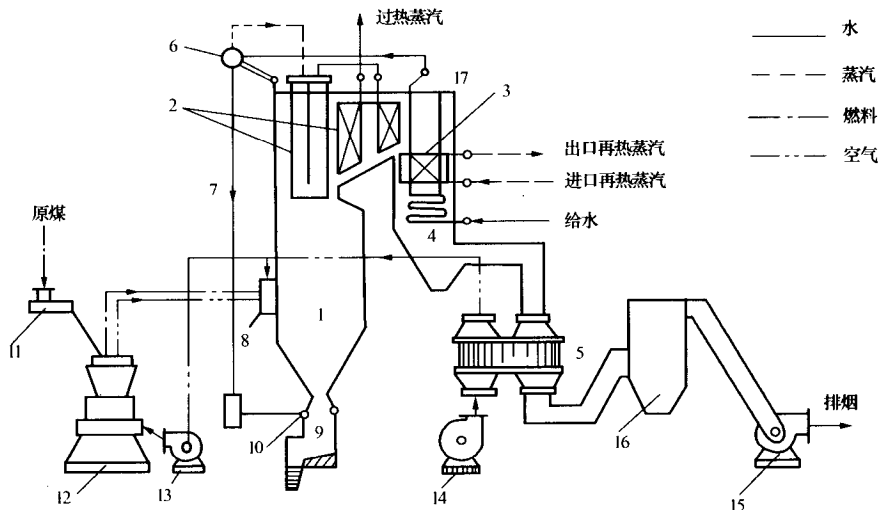


图 1-1 煤粉锅炉及辅助设备示意图

- 1—炉膛及水冷壁；2—过热器；3—再热器；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—水冷壁下联箱；11—给煤机；12—磨煤机；13—排粉机；
14—送风机；15—引风机；16—除尘器；17—省煤器出口联箱

1. 锅炉本体

锅炉本体是锅炉设备的主要部分，是由“锅”和“炉”两大部分组成的。“锅”即汽水系统，它的主要任务是吸收燃料放出的热量，使水加热、蒸发并最后变成具有一定参数的过

热蒸汽。它由省煤器、汽包、下降管、联箱、水冷壁、过热器和再热器等设备及其连接管道和阀门组成。

(1) 省煤器。位于锅炉尾部垂直烟道，利用烟气余热加热锅炉给水，降低排烟温度，提高锅炉效率，节约燃料。

(2) 汽包。位于锅炉顶部，是一个圆筒形的承压容器，其下部是水，上部是汽，它接受省煤器的来水，同时又与下降管、联箱、水冷壁共同组成水循环回路。水在水冷壁中吸热而生成的汽水混合物也汇集于汽包，经汽水分离后向过热器输送饱和蒸汽。

(3) 下降管。是水冷壁的供水管道，其作用是把汽包中的水引入下联箱再分配到各个水冷壁管中。

(4) 水冷壁下联箱。是一根直径较粗两端封闭的管子，其作用是把下降管与水冷壁连接在一起，以便起到汇集、混合、再分配工质的作用。

(5) 水冷壁。位于炉膛四周，其主要任务是吸收炉内的辐射热，使水蒸发，它是现代锅炉的主要蒸发受热面，同时还可以保护炉墙。

(6) 过热器。其作用是将汽包来的饱和蒸汽加热成具有一定温度的过热蒸汽。

(7) 再热器。其作用是将汽轮机中做过部分功的蒸汽再次进行加热升温，然后再送往汽轮机中继续做功。

“炉”即燃烧系统，它的任务是使燃料在炉内良好的燃烧，放出热量。它由炉膛、燃烧器、点火装置、空气预热器、烟风道及炉墙、构架等组成。

(1) 炉膛。是由炉墙和水冷壁围成的供燃料燃烧的空间，燃料在该空间内呈悬浮状燃烧，释放出大量的热量。

(2) 燃烧器。位于炉膛四角或墙壁上，其作用是把燃料和空气以一定速度喷入炉内，使其在炉内能进行良好的混合以保证燃料及时着火和迅速完全地燃烧。

(3) 空气预热器。位于锅炉尾部烟道，其作用是利用烟气余热加热燃料燃烧所需要的空气，不仅可以进一步降低排烟温度，而且对于强化炉内燃烧、提高燃烧的经济性、干燥和输送煤粉都是有利的。

(4) 烟风道。是由炉墙、部分受热面管道及包墙管等组成的通道，用以引导烟气的流动，并经各个受热面进行热量交换，分为水平烟道和尾部烟道。

2. 辅助设备

辅助设备包括通风设备（送、引风机）、燃料运输设备、制粉系统、除灰渣及除尘设备、脱硫设备等。

(二) 电厂锅炉的工作过程

如图 1-1 所示，由原煤仓落下的原煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 磨制成煤粉。在原煤磨制过程中需要热空气对煤进行加热和干燥，因此外界冷空气通过送风机 14 送入锅炉尾部烟道的空气预热器 5 中，被烟气加热成为热空气进入热风管道。其中一部分热空气经排粉机 13 送入磨煤机中，对煤进行加热和干燥，同时这部分热空气也是输送煤粉的介质；另一部分热空气直接经燃烧器进入炉膛参与煤粉的燃烧。从磨煤机排出的煤粉和空气的混合物经燃烧器 8 进入炉膛 1 内燃烧。

煤粉在炉膛内迅速燃烧后放出大量的热量，使炉膛火焰中心具有 1500°C 或更高的温度。炉膛四周内壁布置有许多的水冷壁管，炉膛顶部布置着顶棚过热器及炉膛上方布置着屏式过

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，其内部的工质在吸收炉膛的辐射热的同时，使火焰温度降低，保护炉墙不致被烧坏。为了防止熔化的灰渣黏结在烟道内的受热面上，烟气向上流动到达炉膛上部出口处时，其温度要低于煤灰的熔点。

高温烟气经炉膛上部出口离开炉膛进入水平烟道，与布置在水平烟道的过热器 2 进行热量交换，然后进入尾部烟道，并与再热器 3、省煤器 4 和空气预热器 5 等受热面进行热量交换，使烟气不断放出热量而逐渐冷却下来，使得离开空气预热器的烟气温度通常在 $110\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。低温烟气再经过除尘器 16 除去大量的飞灰，最后只有少量的细微灰粒随烟气由引风机 15 送入烟囱排入大气。

煤粉在炉膛中燃烧后所生成的较大灰粒沉降到炉膛底部的冷灰斗中，被逐渐冷却而凝固落入排渣装置 9 中，形成固态排渣。

由给水泵送向锅炉的给水，经过高压加热器加热后进入省煤器，吸收锅炉尾部烟气的热量后进入汽包 6，并通过下降管 7 引入水冷壁下联箱 10 再分配给各个水冷壁管。水在水冷壁中吸收炉膛高温火焰和烟气的辐射热，使部分水蒸发变成饱和蒸汽，从而在水冷壁内形成了汽水混合物。汽水混合物向上流动并进入汽包，通过汽包中的汽水分离装置进行汽水分离，分离出来的水继续循环，而分离出来的饱和蒸汽经汽包上部的饱和蒸汽引出管送入过热器进行加热，最后达到要求的过热蒸汽通过主蒸汽管道引入汽轮机做功。

对于高参数、大功率机组，为了提高循环热效率和汽轮机的相对内效率，采用了蒸汽的中间再热，即在汽轮机高压缸内做完部分功的过热蒸汽被送回锅炉的再热器中进行加热，然后再送到汽轮机的中、低压缸做功。

二、电厂锅炉的主要特性

表征电厂锅炉主要特性的参数有锅炉容量、蒸汽参数、给水温度。

1. 锅炉容量

锅炉的容量用蒸发量来表示，一般是指锅炉在额定蒸汽参数（压力、温度）、额定给水温度和使用设计燃料时，每小时的最大连续蒸发量，常用符号 D_e 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 锅炉、600MW 锅炉等。

2. 蒸汽参数

电厂锅炉的蒸汽参数一般是指过热器出口处过热蒸汽的温度和压力；对于中间再热锅炉，还应说明再热蒸汽进、出锅炉时的流量、压力和温度。蒸汽温度常用符号 t 或 T 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K ；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压力称为额定蒸汽温度和额定蒸汽压力。

3. 给水温度

电厂锅炉的给水温度是指给水进入省煤器入口处的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。电厂锅炉常用的给水温度参见表 1-1。

三、电厂锅炉的安全指标和经济指标

在火力发电厂中，锅炉是重要设备之一，因锅炉事故造成的发电设备非计划停运占一半以上，所以它的安全性和经济性对电力生产十分重要。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，将非常危险。

1. 电厂锅炉的安全指标

锅炉的安全性常用下述几种指标来衡量：

(1) 连续运行时数=两次计划检修之间运行时数;

(2) 事故率= $\frac{\text{事故停用时数}}{\text{总运行时数}+\text{事故停用时数}} \times 100\%$;

(3) 可用率= $\frac{\text{运行总时数}+\text{备用总时数}}{\text{统计期间总时数}} \times 100\%$ 。

事故率和可用率按一适当长的周期来计算,我国通常以一年为一个统计周期。连续运行时数越长,事故率越低,可用率越高,锅炉的安全可靠性就越高。

2. 电厂锅炉的经济指标

锅炉的经济性可用锅炉效率和锅炉投资及运行时的耗电率来说明。锅炉在运行中需要耗用一定量燃料,但燃料燃烧所放出的热量不能完全被利用,如有些燃料未能完全燃烧,锅炉排出的烟气也要带走一定热量等。因此,锅炉效率是一个重要经济指标。而锅炉本身投资在很大程度上取决于制造时的钢材消耗率。

(1) 锅炉效率。锅炉效率的定义为锅炉每小时的有效利用热量(即水和蒸汽所吸收的热量)占输入锅炉全部热量的百分数,常用符号 η 表示,即

$$\eta = \frac{\text{锅炉有效利用热量}}{\text{输入锅炉总热量}} \times 100\%$$

(2) 锅炉钢材消耗率。锅炉钢材消耗率是指锅炉单位蒸发量(1t/h)所用钢材的重量。锅炉的容量越小、蒸汽参数越高,则钢材消耗率越大,一般来说,电厂各种锅炉的钢材消耗率约在 2.5~5.0t/(t·h⁻¹) 范围内。

(3) 锅炉耗电率。锅炉耗电率是指锅炉每生产 1t 蒸汽所耗用的电量,单位为 (kW·h/t)。锅炉耗电量主要是磨煤机、送风机、引风机、排粉机和给水泵等各种转动机械设备所耗用的电能。锅炉耗电量越低,对外供电就越多。

第二节 锅炉的分类与型号

一、锅炉分类

电厂锅炉的分类方法很多,可以从不同角度对锅炉进行分类和评价,其名称和指标能反映出锅炉某个方面的特征和特性。主要的分类方法有以下几种。

1. 按锅炉容量分

按照锅炉容量(即锅炉蒸发量)的大小,可以把锅炉分为小型锅炉、中型锅炉和大型锅炉,但它们之间没有固定的分界。随着锅炉制造业的迅速发展,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,一般认为 $D_e < 400\text{t/h}$ 的为小型锅炉, $D_e = 400 \sim 670\text{t/h}$ 的为中型锅炉, $D_e > 670\text{t/h}$ 的为大型锅炉。

表 1-1 中列出了几种电厂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。

表 1-1 电厂锅炉的蒸发量及配套机组容量

压力类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (℃)	给水温度 (℃)	蒸发量 (t/h)	配套机组容量 (MW)	汽水流动方式
高压	9.8	540	215	220	50	自然循环
		540		410	100	

续表

压力类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (℃)	给水温度 (℃)	蒸发量 (t/h)	配套机组容量 (MW)	汽水流动方式
超高压	13.7	555/555	240	400	125	自然循环、直流
		540/540		670	200	自然循环
亚临界压力	16.7	540/540	260	1000	300	自然循环
	16.7	540/540	262.4	1025	300	直流
	18.3	540.6/540.6	278.3	2008	600	控制循环
超临界压力	25	545/545	277	1000	300	直流
	25.4	541/549	286	1900	600	
	25	545/545	275	2650	800	

注：1. 表中除超临界压力锅炉为引进外，其余均为国产锅炉；
2. 蒸汽压力数值为表压力；
3. 以分式形式表示的蒸汽温度，分子为过热蒸汽温度，分母为再热蒸汽温度。

2. 按过热蒸汽参数分

按锅炉过热器出口过热蒸汽压力的高低，可将锅炉分为：

- (1) 低压锅炉：过热蒸汽压力为 $p \leq 2.45\text{MPa}$ （表压，下同）。
- (2) 中压锅炉：过热蒸汽压力为 $p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$ 。
- (3) 高压锅炉：过热蒸汽压力为 $p = 7.84 \sim 10.8\text{MPa}$ 。
- (4) 超高压锅炉：过热蒸汽压力为 $p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$ 。
- (5) 亚临界压力锅炉：过热蒸汽压力为 $p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$ 。
- (6) 超临界压力锅炉：过热蒸汽压力为 $p > 22.1\text{MPa}$ 。
- (7) 超超临界压力锅炉：过热蒸汽压力为 $p > 32\text{MPa}$ 。

我国电厂锅炉和部分引进的超临界压力锅炉的蒸汽参数系列见表 1-1。

3. 按燃用燃料分

按燃用燃料可以把锅炉分为燃煤炉、燃油炉、燃气炉。

4. 按燃烧方式分

按燃料在锅炉炉膛中的燃烧方式不同，锅炉可以分为层燃炉、室燃炉、旋风炉和流化床炉等，如图 1-2 所示。

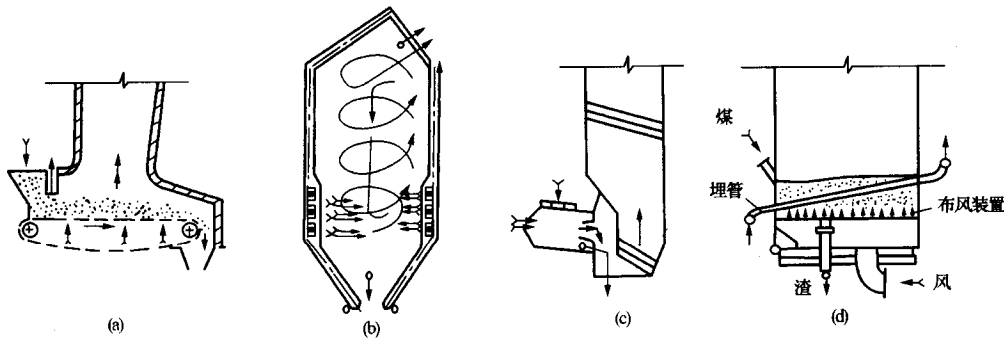


图 1-2 锅炉燃烧方式

(a) 层燃炉；(b) 室燃炉；(c) 旋风炉；(d) 流化床炉

层燃炉具有炉算（或称炉排），煤块或其他固体燃料主要在炉算上的燃料层内燃烧。燃烧所需空气由炉算下的配风箱送入，穿过燃料层进行燃烧反应。这类锅炉多为小容量、低参数的工业锅炉。

室燃炉是目前电厂锅炉的主要型式。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，燃烧时可以形成火炬，也称火炬燃烧。

旋风炉是将一个圆柱形旋风筒作为主燃烧室的炉子，旋风筒用水冷壁管弯制而成，内壁敷以耐火材料。气流沿切向进入旋风筒，并在筒内高速旋转，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方式，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腾，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，使床层温度控制在 $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 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。

5. 按煤粉炉的排渣方式分

在燃烧煤粉的室燃炉中，根据排渣方式的不同，又可分为固态排渣炉 [见图 1-2 (b)] 和液态排渣炉。固态排渣煤粉炉是我国电厂锅炉的主要型式。

固态排渣炉在燃用灰熔点低的煤时，往往造成严重结渣，而液态排渣炉恰恰能克服这一缺点。在液态排渣炉内，火焰中心位置较低，部分水冷壁敷有耐火材料，所以炉膛下部温度很高，使落到炉底的灰渣呈熔化状态，导致炉底积有一层液态灰渣，并通过出渣孔流到炉外。图 1-3 为液态排渣炉常用的几种形式。

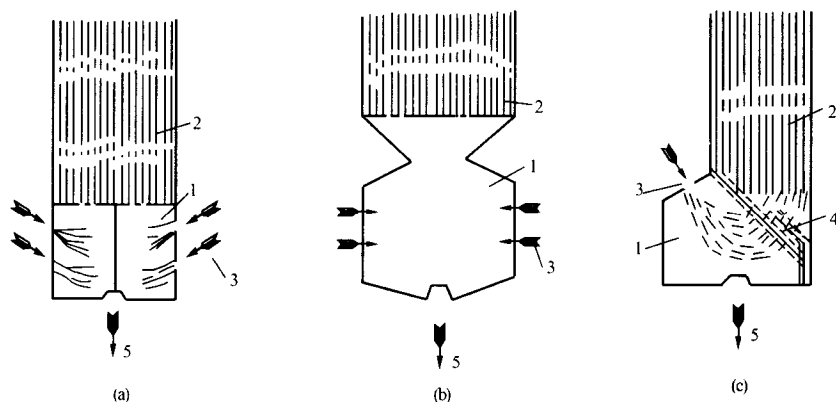


图 1-3 液态排渣炉

(a) 开式单室液态排渣炉；(b) 半开式单室液态排渣炉；(c) 双室液态排渣炉

1—敷有耐火材料的受热面；2—冷却室辐射受热面；3—燃料和空气；4—捕渣管；5—液态渣