

国家骨干高职院校建设项目教材

火电厂锅炉运行与维护

主 编 韩 琳 丛 靖

副主编 王晓峰 谢亮发 王建新



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家骨干高职院校建设项目教材

火电厂锅炉运行与维护

主 编 韩 琳 丛 靖

副主编 王晓峰 谢亮发 王建新



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为适应高职高专培养目标,以“适用、实用、够用”为度来编写,是一本具有高职特色的工学结合教材。

本书主要讲述大型火力发电厂燃煤锅炉的设备、运行及维护。本书共分十一章,主要内容包括:锅炉系统巡查、锅炉的风烟系统、锅炉制粉系统、锅炉汽水系统、煤粉燃烧理论基础、燃烧设备、过(再)热设备、蒸汽净化、锅炉负荷及蒸汽参数监视、600MW 机组锅炉运行导则及锅炉热经济性。

本书可作为高职高专电力技术类电厂热动力专业、火电厂集控运行及相关专业教学用书,也可作为从事相关专业的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂锅炉运行与维护 / 韩琳,丛靖主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2014.3
国家骨干高职院校建设项目教材
ISBN 978-7-5170-1781-3

I. ①火… II. ①韩… ②丛… III. ①火电厂—锅炉
运行—高等教育—教材②火电厂—电厂锅炉—维修—
高等教育—教材 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第043447号

书 名	国家骨干高职院校建设项目教材 火电厂锅炉运行与维护
作 者	主编 韩琳 丛靖 副主编 王晓峰 谢亮发 王建新
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 15印张 356千字
版 次	2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是为适应高职高专人才培养目标的需要,考虑国内电厂现阶段实际情况,由广东水利电力职业技术学院与广州黄埔电厂合编的一本工学结合教材。

因为本书的主要面向对象为高职高专层次学生,所以,在编写过程中特别注重理论知识的够用和理论知识与实际相结合的原则。本书在总结广东水利电力职业技术学院“电厂锅炉”课程组长期教学和教材建设的基础上,参考黄埔电厂内部培训教材的部分内容,本着“以就业为导向、以能力为本位”的原则,在教材体系上做了较大调整,对一些繁琐的公式推导予以删除,增加大量工程实践的相关内容,以适应高职高专注重技能训练的需要。

全书共11章,由广东水利电力职业技术学院和广州黄埔电厂联合编写,其中广东水利电力职业技术学院韩琳、丛靖任主编,负责全书的统稿和修改。其中韩琳编写第一、四、五章;广东水利电力职业技术学院丛靖编写了第八、十一章;王晓峰编写第六、七、九、十章;谢亮发编写第二、三章;王建新也参加了编写工作。本书由黄埔电厂主审,编者对主审对本书所付出的心血和汗水深表谢意!在本书的编写过程中,电力行业的专家和兄弟院校的老师提出了许多宝贵的建议和意见。在此,所有编写人员对主审及关心、支持本书出版的专家、学者表示由衷的感谢!

由于编者水平有限,书中缺点和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2013年11月

目录

前言

第一章 绪论	1
第一节 火力发电厂的工作过程	1
第二节 电厂锅炉的工作过程	2
第三节 电厂锅炉的基本特征	4
第四节 锅炉的分类和型号	5
第五节 电厂锅炉的发展	9
思考题	11
第二章 锅炉系统巡查任务及要求	12
第一节 锅炉系统巡查的任务、要求	12
第二节 锅炉系统巡查的素质要求	15
第三节 锅炉系统巡查的岗位职责	17
思考题	17
第三章 锅炉的风烟系统	18
第一节 风烟系统概述	18
第二节 供风系统	20
第三节 空气预热器	22
第四节 风烟系统的启动和检查	31
思考题	39
第四章 制粉系统	40
第一节 煤粉的性质	40
第二节 磨煤机	42
第三节 煤粉制备系统	52
第四节 煤粉制备系统的主要辅助设备	56
第五节 制粉系统启动与检查	63
思考题	66
第五章 煤粉燃料及燃烧器	67
第一节 燃料性质	67
第二节 燃烧原理	75
第三节 煤粉气流的着火和燃烧	79
第四节 燃烧器及煤粉燃烧新技术	87
第五节 炉膛火焰及压力监视	111

思考题	122
第六章 锅炉受热面	123
第一节 过热器及再热器	123
第二节 热偏差	128
第三节 蒸汽温度调节	131
第四节 受热面的高温积灰、磨损、高温腐蚀	138
思考题	146
第七章 锅炉汽水系统	148
第一节 汽水系统的概述	148
第二节 省煤器	148
第三节 自然循环锅炉蒸发受热面	154
第四节 自然循环锅炉水冷壁	160
第五节 汽包水位监视及调节	164
思考题	168
第八章 蒸汽净化	169
第一节 蒸汽污染	169
第二节 饱和蒸汽的机械携带	170
第三节 蒸汽的溶解性携带	172
第四节 汽水分离和蒸汽清洗装置	174
思考题	180
第九章 锅炉负荷及蒸汽参数监视	181
第一节 典型锅炉运行参数	181
第二节 影响锅炉负荷、蒸汽参数的因素	183
第三节 控制锅炉负荷、蒸汽参数的基本策略	190
思考题	206
第十章 600MW 机组锅炉运行导则	207
第一节 600MW 机组锅炉启动	208
第二节 600MW 机组锅炉停运	215
第三节 600MW 锅炉机组运行导则	218
思考题	222
第十一章 锅炉运行的热经济性	223
第一节 锅炉热平衡	223
第二节 锅炉的各项热损失	225
第三节 锅炉效率及燃料消耗量的计算	229
思考题	230
参考文献	231

第一章 绪 论

第一节 火力发电厂的工作过程

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以及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。现在的发电厂有多种发电途径：靠水力发电的称水电站，以核燃料为能源的称为核电站，还有些靠太阳能、风力和潮汐发电的小型电站，以煤、石油或天然气作为燃料的发电厂统称为火电厂。

火电厂的能量转换过程，概括地说是把燃料中含有的化学能转变为电能的过程。整个生产过程可分为三个阶段：一是燃料的化学能在锅炉中转变为热能，加热锅炉中的水使之变为蒸汽；二是锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，推动汽轮机旋转，将热能转变为机械能；三是由汽轮机旋转的机械能带动发电机发电，把机械能变为电能。能量转换的主要设备——锅炉、汽轮机、发电机，称为火力发电厂三大主机。整个电能生产过程如图 1-1 所示。

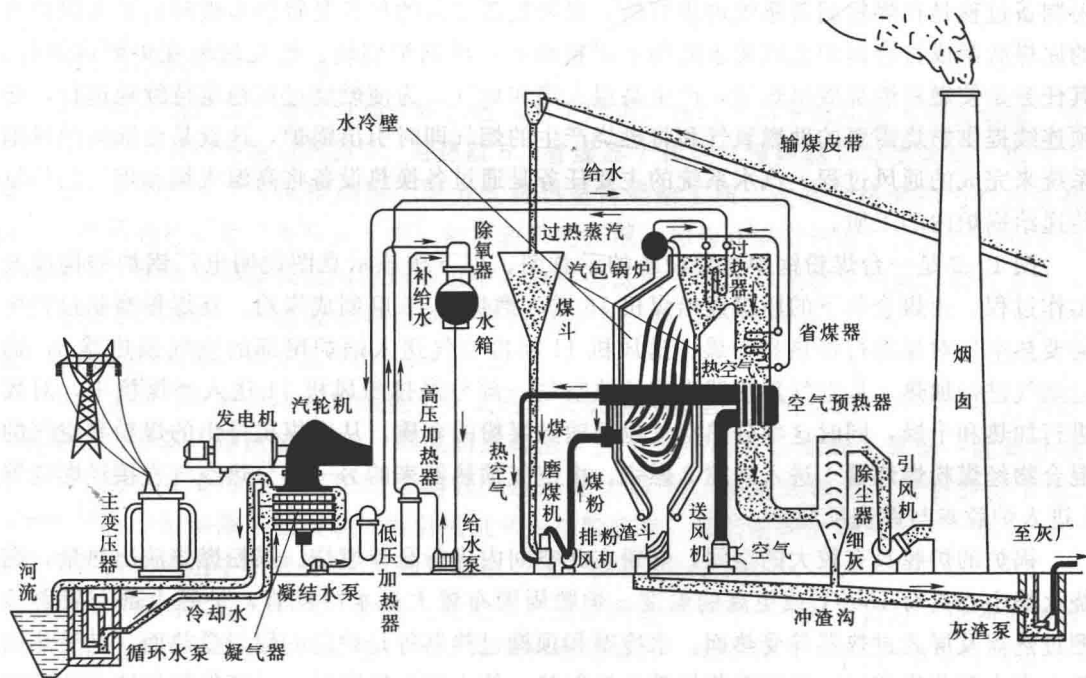


图 1-1 火电厂生产过程示意图

燃料(煤)在锅炉炉膛中燃烧,放出的热量将锅炉炉膛四周水冷壁的水加热,经上升管进入锅炉汽包,在汽包内通过汽水分离装置后的饱和蒸汽进入锅炉过热器,继续吸热成为过热蒸汽,过热蒸汽有很高的压力和温度,由主蒸汽管道引入汽轮机,蒸汽在汽轮机内膨胀做功,冲转汽轮机。汽轮机的转子与发电机的转子通过联轴器连在一起,带动发电机转动并发出电能。电能经变压器将电压升压后,由输电线送至电用户。蒸汽在汽轮机内做功后排出凝汽器,在其中被循环水泵提供的冷却水冷却而凝结成水。凝结水经凝结水泵提升压力后进入低压加热器加热,经除氧器除氧后,由给水泵升压,再经高压加热器进一步加热后送回锅炉省煤器加热后继续重复上述循环过程。水在加热器和除氧器内加热的热源均来自汽轮机的各级抽汽。燃料在锅炉燃烧后生成的烟气经空气预热器,对冷空气进行加热后,经除尘器、引风机由烟囱排出。

第二节 电厂锅炉的工作过程

锅炉是火力发电厂三大主机中最基本的能量转换设备。其作用是使燃料在炉膛内燃烧放出热量,并将锅炉内的工质水加热成具有足够数量和一定能量(汽温、汽压)的过热蒸汽,供汽轮机使用。

目前我国电厂锅炉所用燃料主要是煤。现代大型电厂锅炉一般先将煤磨制成煤粉,然后送入锅炉燃烧放热并产生过热蒸汽。在锅炉中实现煤的化学能转换成蒸汽的热能时,进行着四个相互关联的工作过程,即煤粉制备过程、燃烧过程、通风过程和过热蒸汽的生产过程。由此可将电厂锅炉划分这样几个系统:制粉和燃烧系统、风烟系统、汽水系统。煤粉制备过程是在煤粉制备系统内进行的。煤粉制备过程的任务是将初步破碎后送入锅炉房的原煤磨制成符合锅炉燃烧要求的细小煤粉颗粒,供锅炉燃烧。燃烧过程在炉膛内进行,其任务是使燃料燃烧放出热量,产生高温火焰和烟气。为使燃烧过程稳定持续地进行,必须连续提供燃烧需要的助燃氧气和将燃烧产生的烟气即时引出锅炉,这就是由锅炉的风烟系统来完成的通风过程。汽水系统的主要任务是通过各换热设备将高温火焰和烟气的热量传递给锅炉内的工质。

图1-2是一台煤粉锅炉主要设备的示意图。以下按该示意图说明电厂锅炉的构成及工作过程。由煤仓落下的原煤经给煤机16送入磨煤机15磨制成煤粉。在煤粉磨制过程中需要热空气对煤进行加热和干燥。送风机11将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器8,通过烟气进行加热。从空气预热器出来的热空气一部分经排粉风机14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。从磨煤机排出的煤粉和空气的混合物经煤粉燃烧器1进入炉膛2燃烧。由空气预热器来的另一部分热空气直接经燃烧器1进入炉膛参与燃烧反应。

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。煤粉燃烧放出热量,燃烧火焰中心具有 1500°C 或更高的温度。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。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

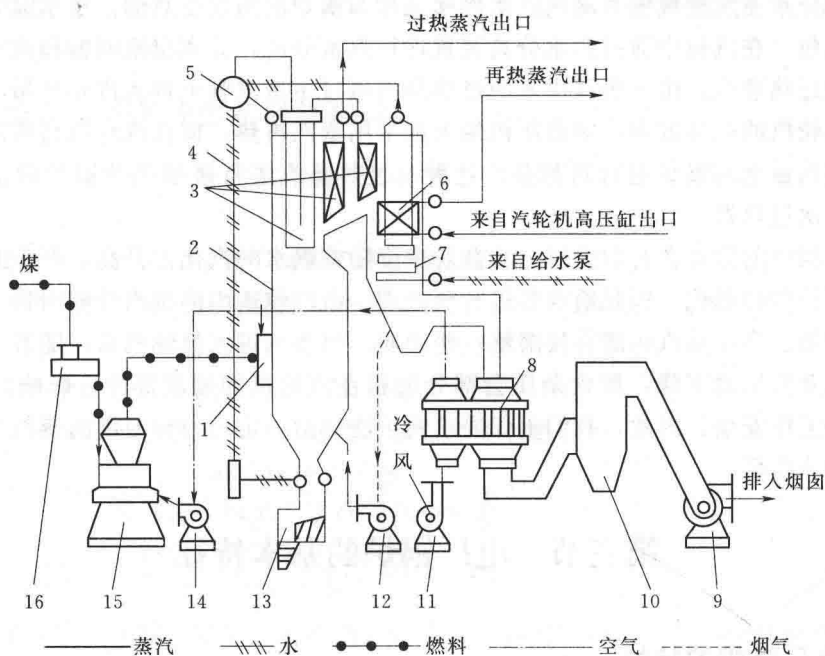


图 1-2 煤粉锅炉及辅助设备示意图

- 1—燃烧器；2—炉膛及水冷壁；3—过热器；4—下降管；5—汽包；6—再热器；7—省煤器；
8—空气预热器；9—引风机；10—除尘器；11—送风机；12—再循环风机；
13—排渣装置；14—排粉机；15—磨煤机；16—给煤机

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，然后再向下流动进入垂直烟道。在锅炉本体的烟道内布置过热器 3、再热器 6、省煤器 7 和空气预热器 8 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，故称为低温受热面和尾部受热面。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。

由于煤中含有灰分，煤粉燃烧所生成的较大灰粒沉降于炉膛底部的冷灰斗中，逐渐冷却和凝固，并落入排渣装置 13，形成固态排渣。大量较细的灰粒随烟气流动一起离开锅炉。为了防止环境污染，锅炉的排烟首先流经除尘器 10，使绝大部分飞灰被捕捉下来。最后，只有少量细微灰粒随烟气由引风机 9 送往脱硫塔，最后由烟囱排入大气。部分锅炉在省煤器前的烟道中布置有 SCR 烟气脱硫装置，降低 NO_x 排放。

送入锅炉的水称为给水。由送入的给水到送出的过热蒸汽，中间要经过一系列加热过程。首先把给水加热到饱和温度，其次是饱和水的蒸发（相变），最后是饱和蒸汽的过热。给水经省煤器加热后进入汽包锅炉（以汽包锅炉为例）的汽包 5，经下降管 4 引入水冷壁下联箱，再分配给各水冷壁管。水在水冷壁中继续吸收炉内高温烟气的辐射热达到饱和状

态,并使部分水蒸发变成饱和蒸汽。水冷壁又称为锅炉的蒸发受热面。汽水混合物向上流动并进入汽包。在汽包中通过汽水分离装置进行汽水分离,分离出来的饱和蒸汽进入过热器吸热变成过热蒸汽。由过热器出来的过热蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机做功。为了提高锅炉—汽轮机的循环效率,对高压机组大都采用蒸汽再热,即在汽轮机高压缸做完部分功的过热蒸汽被送回锅炉进行再加热。这种对过热蒸汽进行再加热的锅炉设备叫作再热器,或称二次过热器。

当送入锅炉的给水含有杂质时,其杂质浓度随着锅水的汽化而升高,严重时甚至在受热面上结垢使传热恶化。因此给水要进行预处理。由汽包送出的蒸汽可能因带有含杂质的锅水而被污染。高压蒸汽还能直接溶解一些杂质。当蒸汽进入汽轮机后,随着膨胀做功过程的进行,蒸汽压力下降,所含杂质会部分沉积在汽轮机的通流部分,影响汽轮机的出力、效率和工作安全。因此,我们不仅要求锅炉能供给一定压力和温度的蒸汽,还要求它具有一定的洁净度。

第三节 电厂锅炉的基本特征

一、电厂锅炉的特性

表征锅炉设备基本特征的有:锅炉容量、蒸汽参数、燃烧方式、汽水流动方式和锅炉整体布置等方面。

锅炉容量:锅炉的容量用蒸发量表示,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。单位为 t/h 或 kg/s 。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 $600MW$ 锅炉。

蒸汽参数:锅炉的蒸汽参数是指锅炉的蒸汽压力和温度。通常指过热器和再热器出口处的蒸汽压力和温度,蒸汽压力单位为 MPa ,温度单位为 $^{\circ}C$ 或 K 。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。

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,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。

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蒸汽的过热器,一侧吸收烟气的热量,另一侧把热量传给水或蒸汽。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,所以其内部工质应不断流动。锅炉省煤器中的工质(水)和过热器中的工质(蒸汽)都是一次流过受热面的。给水流经省煤器的阻力由给水泵提供的压头来克服。过热器中蒸汽的流动阻力是由压力降来克服的,即在过热器进口和出口之间存在压力差。而流经蒸发受热面的工质为水和汽的混合物。对于不同结构的锅炉,汽水混合物可能一次或多次流经蒸发受热面。所谓锅炉的汽水流动方式就是指推动汽水混合物流动的方式。

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。

电厂锅炉存在这样几个明显特点:电厂锅炉一般都是蒸发量在 $400t/h$ 以上,超高压以上的压力,且大都进行中间再热,即锅炉容量大,蒸汽参数高。大容量、高参数电厂锅



炉热效率都很高，在 90% 以上。大型电厂锅炉为实现安全、经济运行，大都设置一套高度可靠的自动化控制装置。

二、电厂锅炉的安全和经济指标

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和经济指标来表示。

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 = 两次检修之间运行的小时数。

(2) 事故率 = $\frac{\text{事故停用小时数}}{\text{总运行小时数} + \text{事故停用小时数}} \times 100\%$ 。

(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。

锅炉的经济性可用锅炉效率和锅炉的投资来说明。锅炉在运行中需要耗用一定量的燃料，但燃料燃烧所放出的热量不能完全被利用：有些燃料未能完全燃烧，锅炉排出的烟气也带走一定热量等。因此，锅炉效率是一重要经济指标。而锅炉本身的投资在很大程度上取决于制造时钢材的使用率。

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

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

钢材使用率是锅炉生产 1t/h 蒸汽所用钢材的吨数。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 2.5~5t/(t/h) 范围内。

第四节 锅炉的分类和型号

一、锅炉的分类

锅炉的分类方法很多，主要有以下几种。

1. 按锅炉的用途分类

固定式锅炉按其用途可分为：

(1) 电站锅炉：锅炉产生的蒸汽主要用于发电的锅炉。

(2) 工业锅炉：蒸汽主要用于工业企业生产工艺过程以及采暖和生活用的锅炉。

(3) 热水锅炉：用以产生热水供采暖、制冷和生活用的锅炉。

2. 按锅炉容量分

按照蒸发量的大小, 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, 一般认为 $D_e < 400\text{t/h}$ 的是小型锅炉, $D_e = 400 \sim 670\text{t/h}$ 的是中型锅炉, $D_e > 670\text{t/h}$ 的是大型锅炉。

表 1-1 中列出了几种典型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。

3. 按锅炉蒸汽参数分

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 ($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$)、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。

我国电厂锅炉和部分引进的超临界压力锅炉的蒸汽参数系列可见表 1-1。

表 1-1 典型电厂锅炉简况

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
				410	100	
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
	25.2	541/569	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. 蒸汽压力的数值为表压力。

3. 以分子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。

4. 按锅炉燃烧方式分

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。各种锅炉的燃烧方式如图 1-3 所示。

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

室燃炉是目前电厂锅炉的主要形式。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。在燃烧煤粉的室燃炉中, 根据排渣方式的不同, 可分为固态排渣炉和液态排渣炉。在我国电厂锅炉中, 固态排渣炉占有绝对的优势。

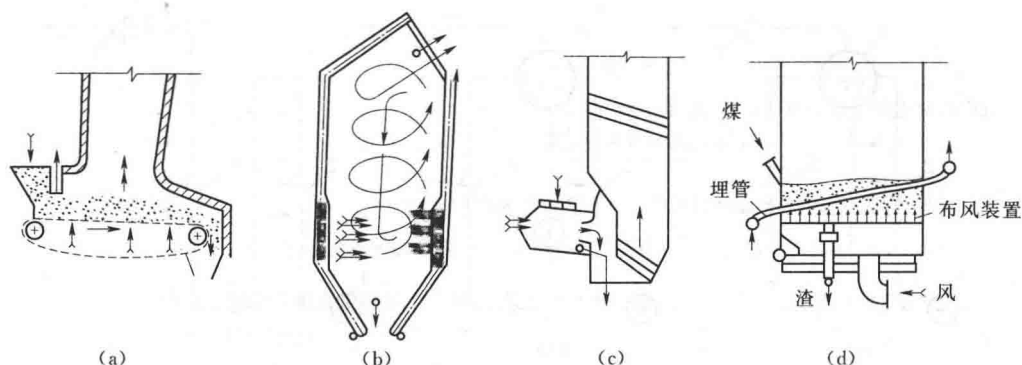


图 1-3 锅炉燃烧方式

(a) 层燃炉；(b) 室燃炉；(c) 旋风炉；(d) 流化床炉

旋风炉是一个圆柱形旋风筒作为燃烧室的炉子，气流在筒内调整旋转，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 $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。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. 按水的循环方式分

按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，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 4、受热的蒸发管 6、联箱 5 和汽包 3 组成。它们联结成一个闭合的蒸发系统。给水经给水泵 1 流入省煤器 2，受热后进入蒸发系统。当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，而不经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，故在联箱 5 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 3。水和蒸汽在汽包内分离，蒸汽由汽包上部引出经过过热器 7 过热，而分离出来的水与进入汽包的给水混合，流入下降管往复循环。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，故称为自然循环。单位时间内进入蒸发管的循环水量同生成汽量之比称为循环倍率。自然循环锅炉的循环倍

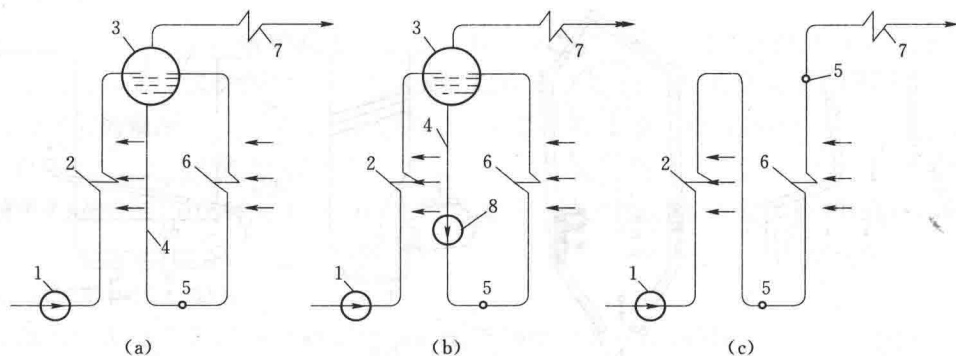


图 1-4 蒸发受热面内工质流动方式

(a) 自然循环; (b) 控制循环; (c) 直流式

1—给水泵; 2—省煤器; 3—汽包; 4—下降管; 5—联箱; 6—蒸发管; 7—过热器; 8—循环泵

率约为 4~30。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, 主要区别在于控制循环锅炉在下降汇总管上设置了循环泵 8, 以增强工质循环流动的推动力。控制循环锅炉的循环倍率在 3~10 之间, 一般为 4 左右。

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。但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, 即循环倍率等于 1。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压头来克服的。直流锅炉既可设计为临界压力以下, 也可设计为超临界压力。

随着超临界压力锅炉的发展以及炉膛强度的提高, 又发展起来一种新的锅炉形式, 即复合循环锅炉。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, 即循环倍率大于 1; 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, 循环倍率等于 1。

6. 按排渣方式分

可分为固态排渣锅炉、液态排渣锅炉。

二、锅炉的型号

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。国产电厂锅炉型号一般的表示方式如图 1-5 所示。

例如, DG-670/13.7-540/540-M8 表示东方锅炉厂制造, 锅炉容量为 670t/h, 其过热汽压力为 13.7MPa, 过热汽和再热汽的出口温度均为 540℃, 设计燃料为煤, 设计序号为 8。

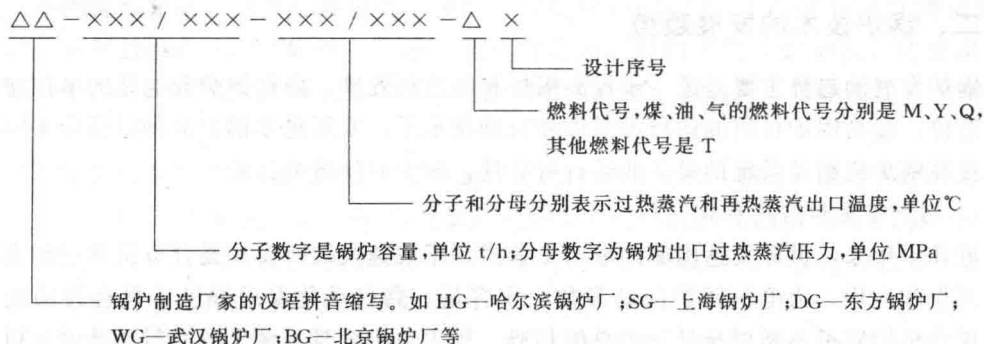


图 1-5 国产电厂锅炉型号表示

第五节 电厂锅炉的发展

一、我国电厂锅炉发展概况

我国火力发电经历了四个发展阶段。在 1949~1960 年的第一阶段,我国已经开始自行设计,制造了 6MW、12MW、25MW、50MW 中压和高压汽轮发电机组配套的锅炉。在 1961~1980 年的第二阶段,我国自行研制了超高压 125MW、200MW 和亚临界压力 300MW 汽轮发电机组配套的 400t/h、670t/h、1000t/h 的自然循环锅炉和直流锅炉。在 1981~1990 年的第三阶段,火电装机容量增加了一倍以上,并从美国引进技术制造了先进的与 300MW 和 600MW 汽轮发电机组配套的 1025t/h 和 2008t/h 控制循环锅炉。同时还进口了多台 300~800MW 亚临界压力和超临界压力锅炉,另外还建设了 100MW 级的燃气—蒸汽联合循环发电机组。在 1991 年以后的第四阶段,火力发电伴随水力发电和已起步的核能发电继续加快发展,着重于努力提高火力发电的各项技术经济指标,尽可能达到节约能源并改善环境的目的。因此,循环流化床锅炉和燃气—蒸汽联合循环发电机组得到了较快的发展。

20 世纪八九十年代,我国着重发展亚临界压力 300MW 和 600MW 规模机组;进入 21 世纪重点发展超临界压力的 600 (650) MW 和超超临界压力 1000MW 机组;同时也进口了一批超临界压力的 300MW、500MW 和 800MW 机组。在燃煤机组的建设中,600MW 超临界和超超临界机组由于国产化率高,运行可靠性高,符合电网运行安全要求等优点,成为主力机型。

目前,我国还有大量的大型机组正在建设之中。人均年占有发电量与发达国家相比仍较低。全国平均供电煤耗率逐年下降,已由 2005 年的 375g 标准煤/(kW·h) 降低到 2010 年 335g 标准煤/(kW·h)。我国火电机组的年均供电煤耗比国外先进水平约高 30~50g 标准煤/(kW·h) 左右。一次能源利用率较低,中小型机组所占比例较大,因而煤耗高,污染严重。需采取有效措施和先进技术降低煤耗,如增加高效大容量机组的比重,应逐步关闭淘汰小型机组锅炉,有条件的可改为热电联产或燃气—蒸汽联合循环。

二、锅炉技术的发展趋势

锅炉发展的趋势主要是进一步提高锅炉和电站热效率,降低锅炉和电站的单位功率的设备造价,提高锅炉机组的运行灵活性和自动化水平,发展更多锅炉品种以适应不同的燃料,提高锅炉机组及其辅助设备的运行可靠性,减少对环境的污染。

1. 锅炉容量和蒸汽参数

近几十年来,世界发达国家的电力工业得到了飞速发展,特别是计算机和耐温金属材料的开发和应用,为电厂锅炉向高参数、大容量、高自动化发展提供了强有力的技术支持。单台机组容量不断增长是一个总的趋势。扩大单机容量可使发电容量迅速增长以适应社会经济发展的需要,同时可以使基建投资和设备费用降低,减少运行费用以及节约金属材料。

随着机组容量的增大和节约燃料的需要,提高电厂热效率就变得更加迫切,提高锅炉所产生蒸汽压力、温度和采用蒸汽再热是提高热电转换效率的有效方法。例如,对一个400MW的单元机组来说,采用超临界压力(24.12MPa)蒸汽参数的供电效率比采用亚临界压力蒸汽参数高1.4%,可从37.4%提高到38.8%,虽然投资增加了2.4%~3.5%,但经济上仍是合算的。

提高蒸汽温度可有效提高电厂循环效率,但由于汽温提高受到金属材料允许温度的限制或要使用昂贵的优质合金钢,目前世界主要工业国家选用的蒸汽温度一般限制在570℃以下,多采用540℃左右。

超高压以上机组多采用蒸汽中间再热,采用一次再热可提高循环热效率4%~6%,二次再热可再提高约2%。但采用蒸汽中间再热时,管道系统和机组运行均较为复杂。因此大机组目前一般采用一次再热。

热电联产是提高燃料能量利用率的有效方法。热电联产可以减少凝汽式电厂的凝汽损失或者根本上不存在凝汽损失,可以省去数量众多、效率较低的小锅炉房,既节省了能源,又保护了环境。粗略估计,一个工厂若采用自备热电联产电厂,要比从电网供电,由效率低的小锅炉供热节省30%~40%的燃料。

2. 强化环境保护,发展洁净燃煤技术

随着工业的发展,燃煤对环境的污染日趋严重,而环境保护的要求却日益严格。这是推动锅炉发展清洁而有效燃烧技术的动力。此外,随着煤炭资源的逐渐减少,煤炭供应的紧张,促使锅炉不得不燃用劣质烟煤、难烧的贫煤、无烟煤等,因而也推动了劣质煤燃烧技术的发展。

近些年来,在常规成熟和高效的煤粉燃烧发电技术基础上,开展对燃烧污染物减排处理的研究,在解决锅炉燃烧生成的 NO_x 和 SO_x 的污染问题上取得了很大的进展。例如:已开发了选择性催化还原脱氮技术和低 NO_x 燃烧器,使 NO_x 的排放量得到了控制;采用烟气脱硫和煤粉炉中加喷石灰石粉的脱硫技术已是比较成熟的煤粉锅炉脱硫技术,在电厂中得到了日益广泛的应用。目前火电厂应用的脱硝手段有三种:低氮燃烧脱硝、选择性催化还原法(SCR)脱硝和非选择性催化还原法(SNCR)脱硝。低氮燃烧脱硝是在燃烧过程中控制 NO_x 的产生,也称前端脱硝;SCR和SNCR是对燃烧锅炉排放的尾气脱硝,净



化尾气中的氮氧化物，也称后端脱硝。国内的脱硝机组 70% 采用了 SCR 尾气脱硝技术；低氮燃烧脱硝目前在 300MW 以上新建机组都有应用，但由于脱除效率低，需要跟 SCR 系统联合使用；SNCR 脱硝效率低，对温度窗口要求严格，更适合老机组改造，目前国内应用不多。

开发新的低污染的燃煤发电技术，如循环流化床燃烧技术（CFB）既能在燃烧中高效地脱硫，又能控制 NO_x 的生成，对劣质煤还有较好的适应性。因此，受到了电力工业、锅炉制造业的重视，包括我国在内的世界许多知名锅炉厂都在努力开发这种技术。近几年来，这项燃烧技术在我国得到了广泛的应用。

目前燃煤联合循环发电技术主要有这样几种方式：整体煤气化联合循环发电（IGCC），增压流化床联合循环发电（PCFB-CC），以及为城市既供电又供热，还供应煤气的所谓三联供技术。

思考题

1. 火力发电厂中存在哪几次能量转换？各在什么设备中完成？
2. 简述锅炉的生产流程。
3. 常用的锅炉安全技术指标有哪些？并说明它们的意义。