

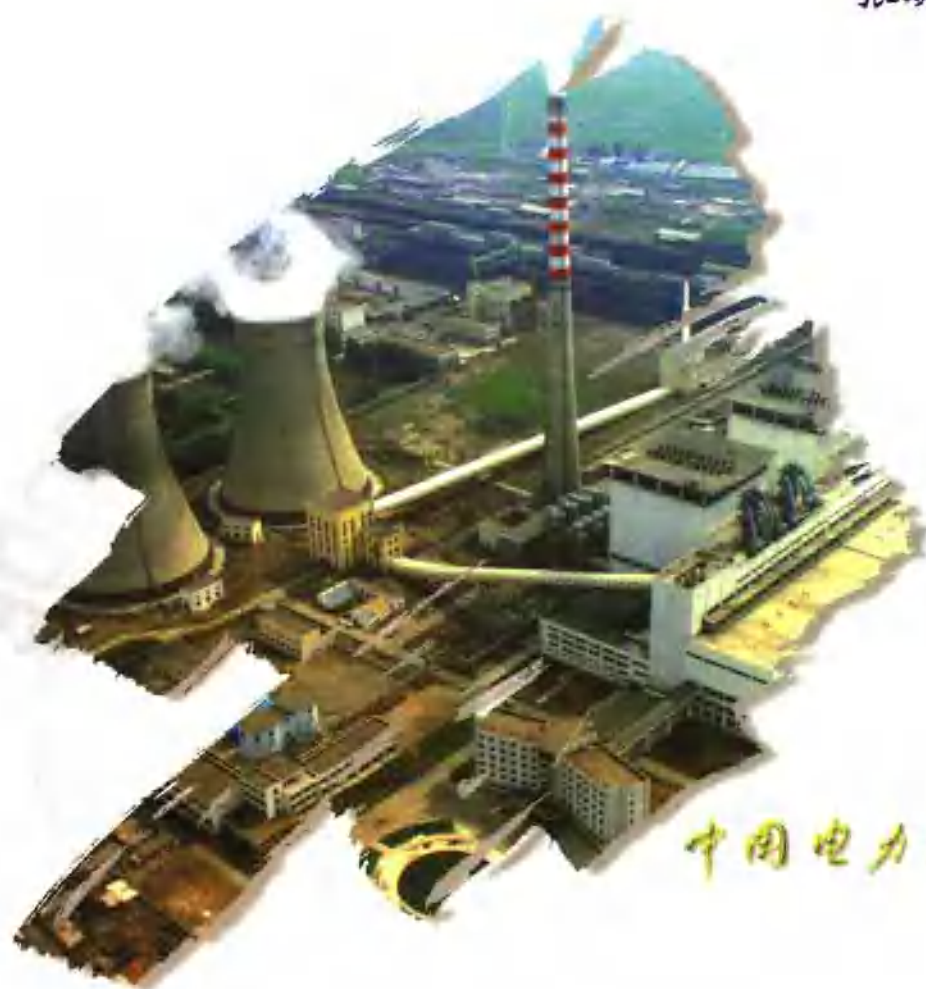
300MW火力发电机组丛书

第二版

第一分册

燃煤锅炉机组

张晓梅 主编



中国电力出版社

300MW火力发电机组丛书

第二版

第一分册

燃煤锅炉机组

张晓梅 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《300MW 火力发电机组丛书》的第一分册（第二版）。目前，300MW 机组已成为我国火力发电的主力机组。本书扼要叙述了锅炉高效、低污染燃烧和工质流动、传热的基本理论和技术。在此基础上，以 300MW 机组的几种典型锅炉为例，系统地阐述了现代大型电站锅炉主要部件及辅助设备的结构、系统、运行特点及故障防治，同时介绍了本学科技术发展的最新成就。

本书可供从事 300MW 及其他大容量锅炉机组运行、检修和管理方面有关的工程技术人员参考，可用作培训教材，也可供高等院校热能动力类、电力工程类专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

燃煤锅炉机组. 第 1 分册/张晓梅主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2006

(300MW 火力发电机组丛书)

ISBN 7-5083-4245-3

I. 燃... II. 张... III. 燃煤锅炉—火力发电 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 039910 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 9 月第一版

2006 年 7 月第二版 2006 年 7 月北京第九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30 印张 737 千字

印数 23081—26080 册 定价 47.00 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)

《300MW 火力发电机组丛书》第二版

编 委 会

主 编 吴季兰

副 主 编 张晓梅 涂光瑜 高 伟

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁学俊 尹项根 冯慧雯 叶 涛

刘 沛 丘纪华 吴季兰 陈 刚

张永立 张国强 张晓梅 张家琛

陆继明 郑 瑛 贺国强 胡能正

涂光瑜 高 伟 徐明厚 黄树红

熊信根

第二版前言

进入 21 世纪以来,随着我国经济的飞速发展,电力需求急速增长,促使电力工业进入了加快发展的新时期。我国电力工业的电源建设和技术装备水平有了较大的提高,大型火力发电机组有了较快增长,亚临界参数的 300、600MW 机组,甚至超临界的 600~800MW 机组,已经成为我国各大电网的主力机组。

由于引进型 300MW 机组具有调峰性能好、安全可靠、经济性好、负荷适应性广及自动化水平高等特点,早已成为我国现有运营的火电机组中的主力机型,对我国电力工业的发展起到了积极的作用。有关工程技术人员、现场生产人员急需了解和掌握这些高参数、大容量机组的结构、系统和运行知识。为此,1998 年前我们在 300MW 火力发电机组培训教材的基础上组织编写了这套《300MW 火力发电机组丛书》。丛书第一版于 1998 年 8 月正式出版发行。

此套丛书面市以来,深受广大读者的厚爱,发行量逐年递增,已达数万套。为了适应当前电力大发展和广大读者日益增长的对大容量火电机组的知识需求,我们又根据制造厂、运行电厂、研究单位多年来对 300MW 等级机组在技术改进、结构完善、系统优化、运行水平提高等方面的新情况,对这套丛书各分册的内容进行了更新修改,并加以充实、提高,使之更适合大容量火电机组的目前状况以及有关工程技术人员、现场生产人员的知识需求和技术培训的要求,并便于高等院校热能动力类和电力工程类专业师生参考。

丛书包括《燃煤锅炉机组》、《汽轮机设备及系统》、《汽轮发电机及电气设备》、《计算机控制系统》四个分册。全套丛书由华中科技大学吴季兰担任总主编。

《燃煤锅炉机组》是《300MW 火力发电机组丛书》的第一分册。全书共分十一章,其内容密切结合我国现有的 300MW 机组锅炉的具体情况,在扼要叙述基本理论的基础上,着重分析了不同类型锅炉的主要系统、各部件的基本结构及其特点。

本书由华中科技大学张晓梅主编。参加编写的人员有张晓梅(前言,第一、五章及第四章第六节),徐明厚(第二章),丘纪华(第三章及第四章第一~五节),郑瑛(第六章),叶涛(第七章),丁学俊(第八章),陈刚(第九、十、十一章)。

本书在编写过程中参阅了各高等院校相关的教材及各大型火电厂、锅炉制造厂、电力设计院及研究所的有关资料、文献,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

第一版前言

为促进社会主义经济建设的发展,我国正大力发展电力工业,新建及在建不少高参数、大容量的火力发电机组,尤以 300MW 机组居多。300MW 机组已成为我国各大电网的主力机组,因此,有关工程技术人员、现场生产人员急需了解和掌握这些高参数、大容量机组的结构、系统及运行知识。为此,我们组织编写了这一套《300MW 火力发电机组丛书》。

丛书包括《燃煤锅炉机组》、《汽轮机设备及系统》、《汽轮发电机及电气设备》、《计算机控制系统》四个分册。全套丛书由华中理工大学吴季兰担任总主编。

丛书可供从事 300MW 火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,或作为培训教材使用,也可供其他高参数、大容量火电机组的有关人员,以及高等院校热动力类和电力工程类专业师生参考。

《燃煤锅炉机组》是《300MW 火力发电机组丛书》的第一分册。全书共分十四章,其内容密切结合我国现有的 300MW 机组锅炉的具体情况,在扼要叙述了基本理论、基本结构基础上,着重分析其特点。

本书由华中理工大学容奎恩主编。参加编写的人员有容奎恩(前言,第一、二、三、八章),徐明厚(第四章),栾庆富(第五章),张晓梅(第六、七章),叶涛(第九章),丁学俊(第十章),吴胜春(第十一、十二、十三、十四章)。

本书经北京电力科学研究院王建军审阅,提出了许多有益的建议,在此表示感谢。

本书因编写时间仓促,掌握资料有限,加上编者水平所限,错漏之处难免,望读者指正。

编 者

1997 年 6 月

目 录

第二版前言

第一版前言

► 第一章 300MW 机组燃煤锅炉概况	1
第一节 大型锅炉机组的作用和要求	1
第二节 电站锅炉的参数、型式及主要技术经济性指标	2
第三节 II 型亚临界参数自然循环锅炉	7
第四节 II 型亚临界参数控制循环锅炉	29
第五节 亚临界参数直流锅炉	40
第六节 塔式亚临界参数低循环倍率锅炉	57
第七节 国外大型电站锅炉总体结构特点	63
► 第二章 燃料、制粉设备及其系统	69
第一节 煤的成分及主要特性	69
第二节 煤粉的基本性质	78
第三节 300MW 锅炉机组常用的磨煤机	82
第四节 制粉系统及其主要部件	109
► 第三章 煤粉燃烧及燃烧设备	127
第一节 煤粉气流的着火燃烧	127
第二节 煤粉炉的炉膛及燃烧器	136
第三节 直流式燃烧器及其布置	139
第四节 旋流燃烧器及其布置	146
第五节 W 型火焰燃烧方式	153
第六节 低 NO _x 燃烧技术	155
► 第四章 蒸发设备及蒸汽净化	159
第一节 锅炉水动力学基础	159
第二节 自然循环锅炉蒸发受热面的特性	162
第三节 强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性及传热恶化	175
第四节 直流锅炉蒸发受热面	184
第五节 控制循环锅炉蒸发受热面	192
第六节 汽包及汽包内部装置	198

▶ 第五章 过热器与再热器	219
第一节 概述	219
第二节 300MW 机组锅炉过热器、再热器结构特点	221
第三节 影响汽温变化的因素	237
第四节 蒸汽温度的调节	239
第五节 过热器的热偏差	247
▶ 第六章 省煤器和空气预热器	255
第一节 尾部受热面概述	255
第二节 省煤器	256
第三节 空气预热器	264
第四节 尾部受热面的积灰	280
第五节 低温受热面的飞灰磨损	283
第六节 空气预热器的低温腐蚀与堵灰	287
▶ 第七章 除尘与除灰系统	293
第一节 概述	293
第二节 静电除尘器	294
第三节 袋式除尘器	313
第四节 锅炉吹灰系统及其运行	324
第五节 灰渣系统及其运行	329
▶ 第八章 锅炉送、引风机及一次风机	342
第一节 轴流式送风机	343
第二节 轴流式与离心式引风机、一次风机	348
第三节 轴流式送风机与引风机的结构及特点	355
第四节 动叶片液压调节机构的工作原理	359
第五节 风机油系统及其保护装置	365
第六节 风机的其他技术特点	374
第七节 风机的运行与维护	376
▶ 第九章 锅炉的启动与停运	381
第一节 自然循环汽包锅炉滑参数启动	382
第二节 锅炉的停运	393
第三节 控制循环锅炉启停特点	397
第四节 直流锅炉启停特点	400
▶ 第十章 锅炉的运行调整	407
第一节 锅炉运行调整的任务	407
第二节 锅炉工况变动的影响	407

第三节	负荷分配、蒸汽参数的变化与调整	412
第四节	锅炉燃烧的调整	416
第五节	汽包水位的控制与调整	427
第六节	单元机组的变压运行	431
第七节	锅炉的热平衡及各项热损失	432
第八节	锅炉的燃烧调整试验	436
第十一章	锅炉的运行故障及其防治	440
第一节	制粉系统的故障及其处理	440
第二节	锅炉灭火与烟道再燃烧	446
第三节	锅炉的结渣	449
第四节	过热器管和再热器管的爆漏及其防治	458
第五节	水冷壁管的爆漏及其防治	463
参考文献		469

第一章 300MW 机组燃煤锅炉概况

第一节 大型锅炉机组的作用和要求

300MW 火力发电机组是我国安装得最多的一个容量等级的大型机组,包括国产机组,引进技术国内生产机组以及进口机组。目前 300MW 机组已成为我国火力发电的主力机组。

火力发电厂的生产过程,实际上就是将煤、油及天然气等一次能源转化为二次能源(电力)的能量转换过程。将煤、油及天然气等燃料燃烧或其他热能释放出来的热量,通过金属受热面传递给经过净化的水,并将水或蒸汽加热到一定压力和温度的换热设备,称为锅炉。锅炉是火力发电厂三大主要设备之一。

锅炉炉膛是燃烧燃料的场所,燃料在炉膛内燃烧,燃烧所放出的热量通过辐射传热和对流传热,被水冷壁、过热器、再热器、省煤器等受热面中的工质(水或汽)吸收,工质(水或汽)在这些换热设备中被加热成过热蒸汽,过热蒸汽经管道送至汽轮机推动汽轮机做功,从而带动发电机发电。因此锅炉是进行燃料燃烧、传热和使水汽化三种过程的综合装置。

锅炉中的锅是指在火上加热的盛汽水的压力容器,炉是燃料燃烧的场所,锅炉包括锅和炉两大部分。通常把燃料的燃烧、放热、排渣称为炉内过程;把工质水的流动、传热、热化学等称为锅内过程。

锅炉本体是由汽包(或锅筒)、受热面及连接管道、烟道和风道、燃烧设备、构架(包括平台和扶梯)、炉墙和除渣设备等所组成的整体。锅炉本体要能连续可靠地运行,必须要有连接的烟、风管道以及各种辅助系统和附属设备,组成所谓的锅炉机组。锅炉机组中的辅助系统和附属设备包括:燃料供应系统、煤粉制备系统、给水系统、通风系统、除灰除尘系统、水处理系统、测量及控制系统等。每个辅助系统都配备有相应的机械设备和仪器仪表。

电力一般是不能贮存的。发电设备的出力要随外界负荷的变化而相应变化,这是发电厂生产的一个重要特点,因此作为火力发电厂三大主要设备之一的锅炉,其运行出力必须适应外界负荷的需要。这就要求锅炉运行中要进行一系列的操作,使其供给的燃料量、空气量和给水量等都作相应的变动,不但要满足外界负荷的需要,而且要使锅炉的运行参数(汽压、汽温、水位等)保持在规定的范围内,确保锅炉的安全、经济运行,特别注意要防止发生事故。电业事故对国民经济建设、工农业生产有着极大的危害。发电厂事故停电,不仅使电厂本身遭受损失,而且对企业的生产以及人民生活都有着直接影响。而在火力发电厂的故事中,有相当大的部分是由锅炉事故引起的。据统计,我国大中型火力发电厂中,锅炉事故约占全厂总事故的 70%,而在锅炉机组中常见的事故有四管爆破(即水冷壁、过热器、再热器和省煤器的管子爆破)、结渣、燃烧不稳定、灭火打炮、缺水、满水、回转式空气预热器漏风严重、风机振动,引风机磨损等。在众多的锅炉事故中,尤以四管爆破出现最多,约占

锅炉事故的 60%~70%。由此可见, 锅炉运行的安全性, 对发电厂的安全稳发是非常重要的, 因此锅炉运行必须强调安全性。

全世界火力发电量约占总发电量的 70%, 中国也占 70% 左右, 火力发电厂对国民经济发展有重大的影响。而电站锅炉又是耗费一次能源, 因此必须重视节约能源, 即在保证锅炉安全运行的前提下, 提高锅炉运行的经济性。

锅炉燃烧的燃料主要是煤和油, 燃烧产生的污染物有粉尘、 SO_2 、 NO_x 等。过去锅炉仅对烟气中的粉尘用电除尘器进行脱除, 近年来国家环保部门对控制锅炉烟气中 SO_2 和 NO_x 的排放提出了更高标准。因此炉内燃烧过程的脱硫脱硝或烟气的脱硫脱硝设备也将成为锅炉整体的一部分, 并随着社会的进步和人们对环境要求的提高, 越来越受到重视。

第二节 电站锅炉的参数、型式及主要技术经济性指标

一、锅炉的参数

电站锅炉的参数包括锅炉容量、蒸汽参数及给水温度。

1. 容量

蒸汽锅炉容量是用来表征锅炉供热能力的指标。

大型电站锅炉的容量, 即锅炉蒸发量, 分为额定蒸发量和最大连续蒸发量两种, 单位是 t/h (或 kg/s)。

额定蒸发量是指在额定蒸汽参数、额定给水温度和使用设计燃料, 并保证热效率时所规定的蒸发量。

最大连续蒸发量 (B-MCR) 表示在额定蒸汽参数、额定给水温度和使用设计燃料, 长期连续运行时所能达到的最大蒸发量。最大连续蒸发量通常为额定蒸发量的 1.03~1.2 倍。

2. 参数

电站锅炉参数是表征锅炉供热品位的标志, 包括额定蒸汽参数及额定给水温度。前者是指锅炉过热器主汽阀出口处的额定过热蒸汽压力 (单位为 MPa)、温度 (单位为 $^{\circ}\text{C}$); 后者则为给水进入省煤器入口处的温度 (单位为 $^{\circ}\text{C}$)。对于中间再热锅炉还应同时说明再热蒸汽进、出锅炉的流量、压力和温度。

提高机组效率是促使火电机组发展的原动力, 其主要途径是提高单机容量, 提高蒸汽参数和优化热力系统。

我国 300MW 机组锅炉常采用亚临界参数。表 1-1 是国内已投产部分 300MW 机组锅炉的蒸汽参数与容量。

表 1-1 我国部分 300MW 级燃煤锅炉的蒸汽参数与容量

参 数			额定蒸发量 (t/h)	最大连续蒸发量/ 额定蒸发量
蒸汽压力 (绝对压力, MPa)	蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)		
18.1	541/541*	274	918.4	1.116
17.3	541/541*	282	931.8	1.1
18.42	543/543*	257	924	1.026
18.38	540.6/540.6*	278	922.3	1.112
17.46	540/540*	276	925	1.108

* 为再热蒸汽温度。

二、大型锅炉本体布置型式

锅炉本体的布置是指炉膛及炉膛中的辐射受热面、对流烟道及其中的各对流受热面之间的相互关系（及相对位置）。根据锅炉容量参数、燃料种类、燃烧方式、循环方式和厂房布置条件等的不同，可组成各种锅炉本体布置方案，大容量电站锅炉常用的炉型如图 1-1 所示。

Ⅱ型布置是电站锅炉采用最多的炉型，它由垂直柱体炉膛、水平烟道和下行对流烟道组成，见图 1-1 (a)。采用这种方案，锅炉高度较低，安装起吊方便；受热面易于布置成逆流传热方式；送风机、引风机、除尘器等笨重设备都可低位布置，减轻了厂房和锅炉构架的负载，可以采用简便的悬吊结构。Ⅱ型布置的主要缺点是占地较大；烟道转弯易引起飞灰对受热面的局部磨损；转弯气室部分难以利用，当燃用发热量低的劣质燃料时，尾部对流受热面可能布置不下。无水平烟道Ⅱ型布置可缩小占地面积，见图 1-1 (b)；双折焰角Ⅱ型布置则可改善烟气在水平烟道的流动状态，利用转弯烟道的空间，布置更多的受热面，见图 1-1 (c)。

塔型布置的对流烟道布置在炉膛的上方，锅炉笔直向上发展，取消了不宜布置受热面的转弯室，如图 1-1 (e) 所示。因此采用这种布置的锅炉占地面积小；锅炉对流烟道有自身通风的作用，烟气阻力有所降低（与Ⅱ型方案相比）；烟气在对流受热面中不改变流动方向，故烟气中的飞灰不会因离心力而集中造成受热面的磨损，对于多灰燃料非常有利。但是塔型锅炉的高度很大，过热器、再热器和省煤器都布置得很高，汽、水管道较长；在这种布置中，空气预热器、送风机、引风机、除尘器和烟囪都采用高位布置（布置在锅炉顶部），加重了锅炉构架和厂房的负载，使造价提高。为了减轻转动机械和笨重设备施加给锅炉和厂房的载荷，有时把空气预热器、送风机、引风机、除尘器等布置在地面，构成所谓半塔型布置，见图 1-1 (f)。

箱型布置如图 1-1 (d) 所示，主要用于容量较大的燃油、燃气锅炉。其特点是除空气预热器外的各个受热面部件都布置在一个箱型炉体中，结构紧凑，占地小，密封性好。缺点是锅炉较高，卧式布置的对流受热面的支吊结构复杂，制造工艺要求高。

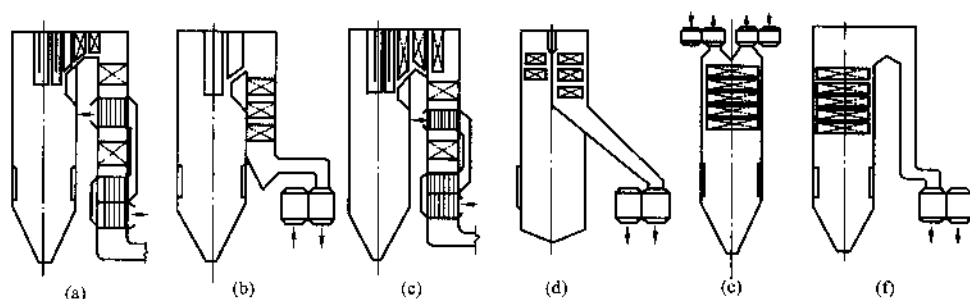


图 1-1 锅炉本体布置示意

(a) Ⅱ型；(b) 无水平烟道Ⅱ型；(c) 双折焰角Ⅱ型；(d) 箱型；(e) 塔型；(f) 半塔型

三、锅炉技术、经济性指标

电站锅炉技术、经济性指标包括锅炉效率、运行可靠性、制造成本及有害物质排放等。

1. 锅炉效率

由锅炉热平衡确定的锅炉热效率是指送入锅炉的全部热量被有效利用的百分比，用 η_{gl} (%) 表示。它是衡量锅炉运行经济性的主要指标。

为保证锅炉正常运行，锅炉机组本身还要消耗部分蒸汽及电能，如风机、泵、吹灰器及排污等。有效能量中减去这些自用能耗即可得到锅炉的净效率。用 η_j (%) 表示。

锅炉的燃烧效率 η_r 则反映燃料燃烧的完全程度，取决于不完全燃烧热损失的大小。

$$\eta_{gl} = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \quad (\%) \quad (1-1)$$

$$\eta_j = \frac{Q_1}{Q_r + \Sigma Q_{zy} + \frac{b}{B} 29270 \Sigma P} \times 100\% \quad (1-2)$$

$$\eta_r = 100 - (q_3 + q_4) \quad (\%) \quad (1-3)$$

式中 Q_1 ——锅炉有效利用热，kJ/kg；

Q_r ——锅炉在单位时间内所消耗燃料的输入热量，kJ/kg；

B ——锅炉燃料消耗量，kg/h；

Q_{zy} ——锅炉自用热耗；kJ/kg；

ΣP ——锅炉辅助设备实际消耗功率，kW；

b ——电厂发电标准煤耗量，kg/(kW·h)；

q_3 、 q_4 ——锅炉化学、机械未完全燃烧热损失，%。

目前国内大型电站锅炉的热效率一般都在 90% 以上，国外随着锅炉容量的增加， η_{gl} 是增加的。

2. 钢材使用率

锅炉钢材使用率是衡量锅炉制造成本的重要指标。定义为：锅炉生产 1t/h 蒸汽所用的钢材吨数。钢材使用率与锅炉参数、循环方式、燃料种类及锅炉部件结构有关。电站锅炉的钢材使用率一般约在 2.5 ~ 5t/(t·h⁻¹)。

在保证锅炉安全、高效运行的基础上，应尽可能降低锅炉钢耗量。设计锅炉时，要协调这几方面的要求，得到最佳方案。

3. 锅炉的可靠性

锅炉工作的可靠程度是锅炉技术水平的重要标志之一。它实质上也是锅炉工作经济性的—种表现。通常可用年连续运行小时数（锅炉在两次检修之间的运行小时数）、锅炉可用率（除事故停用外锅炉全部可带负荷运行时数占统计期间总时数的百分比）和锅炉事故率（锅炉事故停用总时数占除备用时数外统计总时数的百分比）表示，“统计期间”通常为一年。

目前国内大、中型锅炉机组较好的平均指标是连续运行小时数在 5000h 以上，事故率约为 1%，可用率约为 90%。随着锅炉容量的增加，锅炉可用率下降而事故率上升。300 ~ 400MW 锅炉可用率约为 80% ~ 86%。

4. 锅炉烟尘及有害气体排放

锅炉烟尘及有害气体 NO_x、SO₂、CO 等是我国当前主要的大气污染物之一。为了满足环境质量的要求，必须控制锅炉烟气的污染。表 1-2 列出了我国新建燃煤电厂大气污染排放标准。

表 1-2

火力发电厂锅炉烟尘及有害气体最高允许排放浓度

排放物	粉尘 (mg/m^3)	SO_2 (mg/m^3) (在“两控区”内)	NO_x (以 NO_2 计) (mg/m^3)	
浓 度	50	400	$V_{\text{daf}} < 10\%$	1100
			$10\% \leq V_{\text{daf}} \leq 20\%$	650
			$V_{\text{daf}} > 20\%$	450

注 表中数值适用于:

第三时段火电厂 (2004 年 1 月 1 日起新建、扩建和改建火电厂);

除入炉燃料 $Q_{\text{ar,net}} \leq 12550 \text{ kJ/kg}$ 的火电厂及西部非两控区内燃用特低硫煤 ($S_{\text{ar}} < 0.5\%$) 的坑口电厂。

高效电除尘器可降低烟尘排放量,改进燃烧方式、燃烧器结构和燃烧系统可提高燃烧效率,减少 NO_x 、 SO_2 、 CO 的生成与排放。

四、国内外电站锅炉发展概况

锅炉是火力发电厂的主要设备之一,技术、经济和社会的快速发展对电力工业提出了更高的要求,也为锅炉的发展明确了方向。锅炉的发展趋势大致可按下述几方面来说明。

1. 加快发展大容量、高参数机组

增大锅炉容量和提高蒸汽参数是锅炉发展的总趋势。这是因为扩大单机容量可使发电总容量迅速增长以适应生产发展的需要,同时可以使基建投资下降,设备费用降低,减少运行费用以及节约金属材料消耗。在其他条件相同时,锅炉容量增大 1 倍,钢材使用率可减少 5%~20%,所需管理人员也可减少。20 世纪 50~70 年代,大容量机组不断出现。美国于 1973 年投运了 1300MW 机组,锅炉容量为 4398t/h;前苏联于 1981 年投运一台 1200MW 的超临界压力直流锅炉,锅炉容量为 3950t/h。

由于大机组的可用率相对较低,每年故障和计划检修停机时间都比较长,加之 1000MW 以上机组的运行灵活性较差,所以目前机组单机容量达到 1300MW 后不再增大。近 10 年来,国外工业发达国家火力发电主力机组的单机容量一直稳定在 500~800MW。

随着机组容量的增大,提高电厂的热效率就变得更为迫切,提高蒸汽参数和采用蒸汽再热是提高电厂热效率的有效措施。

目前世界主要工业国家大容量锅炉采用的蒸汽压力,一般可分为超高压、亚临界压力和超临界压力三个级别。蒸汽压力由超高压提高到亚临界压力,约可使电厂经济性提高 1.7%。单机容量达 800~1000MW 及以上的锅炉,国外多采用超临界压力或超超临界压力。由亚临界压力提高到超临界压力,电厂经济性又可提高 1.8% 左右。国外正在致力于发展超超临界压力机组,以期望提高 2% 的热效率。但是超临界压力及以上机组一般可用率较低,设备费用较高,故应综合考虑。而国外有的认为超临界压力机组可和亚临界压力机组一样具有较高的可用率。

提高蒸汽温度可有效提高电厂循环热效率,但由于汽温提高要求使用更多的昂贵高合金钢材,致使设备的造价大为提高。目前世界主要工业国家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再热,采用一次再热约可提高循环热效率 4%~6%,二次再热可再提高约 2%。采用蒸汽再热时,管道系统和机组运行均较复杂。因此大机组目前一般采用一次再热,再热蒸汽温度一般与过热蒸汽温度相同。

今后我国要加快发展大容量、高参数机组。新增的主力机组应为 300~600MW，个别在 1000MW 级。研制 300、600MW 空冷机组以及较大容量的 200、300MW 高效供热式机组。加快国内开发、研制超临界压力机组的步伐，通过引进技术或合作制造，逐步实现国产化。同时抓紧对超超临界压力机组关键技术的研究。

2. 强化煤电的环境保护，发展洁净燃煤技术

大容量电站锅炉多燃用劣质煤，煤质多变且耗煤量大，污染严重，因而要求燃煤锅炉对煤种的适应性强，从而也推动了劣质煤燃烧技术的发展。

低污染燃烧技术是近期锅炉发展的一大趋势。为了满足日益严格的环保要求，近二三十年来人们在解决锅炉燃烧生成的硫氧化物和氮氧化物的污染问题上取得了很大进展。例如：已开发了选择性催化还原脱氮技术和低氧化氮燃烧器，使氮氧化物的排放得到控制；已有几种烟气脱硫方法在许多锅炉上获得应用；燃烧中脱硫的流化床燃烧锅炉和炉内喷钙也取得了成功。目前全世界已有 500 多台 CFB 锅炉投入运行，单台最大容量已达 300MW。在建并将建立 200~300MW 级循环流化床锅炉的示范性电站；完成 15MW 增压流化床锅炉联合循环 PFBC-CC 中试工程，建设 100MW PFBC-CC 试验机组。人们正在继续寻求更为经济有效的低污染煤炭燃烧技术，如直接燃煤的燃气—蒸汽联合循环、整体煤气化增湿燃气轮机等煤炭清洁燃烧新方案。现在世界上已有多座容量超百万千瓦的联合循环电厂在运行。预计不久的将来，以燃气—蒸汽循环相结合或超临界压力蒸汽循环的燃煤、高效、低污染的新一代火电机组将在电力工业中崭露头角。

3. 提高运行的可靠性和灵活性

发电厂三大主机中，锅炉的事故率较高，直接影响到电厂的安全经济运行。锅炉的可靠性涉及到设计、设备制造、运行维护和生产管理等各个方面。20 世纪 60 年代中期，工业发达国家的电力工业就开始进行可靠性管理工作。1977 年，美国能源部成立以后，主要是结合设备的更新改造和检修来提高可靠性。同时确保锅炉的安全运行，还开发了故障诊断等技术，使机组运行的可靠性日趋完善。

运行灵活性要求大力发展中间负荷机组，适应电网调峰需要，即可以带低负荷，可以两班制运行。世界各国都十分重视开发调峰机组，美国自 80 年代初就规定：凡今后生产的火电机组一律参加调峰运行。日本由于是以核电机组作为基本负荷机组的，火电机组都必须承担调峰负荷。为了使大型锅炉适应变负荷运行需要，国外大型锅炉普遍在高温负荷区采用内螺纹管。螺旋管圈直流锅炉由于具有负荷调节范围大、启动快、调峰速度快以及低负荷时效率高等优点，因而倍受欢迎。

在炉内燃烧方面，由于动力用煤品位的不断下降，锅炉不但要能燃用各种劣质煤，而且要考虑防止因燃用劣质煤带来的不利影响（结渣、积灰、磨损和环境污染等），提高锅炉对煤种的适应性。为了提高锅炉运行的可靠性和灵活性，大容量锅炉一定要提高锅炉的可控性，配备完善的自动化装置。现代锅炉需要监视的信号以及需要操作的阀门和挡板均很多，必须要有完善的检测和控制手段，并具有高度自动化水平。目前已普遍使用计算机实行监控，并用数字技术和模拟技术实现机炉协调控制、锅炉调节控制、炉膛安全监控等，以及实现了许多辅机的顺序控制和就地控制，进一步提高了火电自动化水平，实现了 AGC 及单元机组集控值班。

由此可见，大型锅炉的发展趋势为：

- (1) 积极开发大容量超临界、超超临界压力机组；
- (2) 开发大型空冷和热电联供锅炉；
- (3) 研制能用劣质煤的大型电站锅炉；
- (4) 开发燃气—蒸汽联合循环锅炉；
- (5) 研究高效优质辅机，提高电站成套水平；
- (6) 研制高效自动化装置；
- (7) 燃烧器由简单的四角布置变化到无双面水冷壁的单炉膛双切圆布置。

第三节 II 型亚临界参数自然循环锅炉

300MW 火力发电机组锅炉的型式很多，锅炉本体的布置形式有 II 型、Γ 型、塔型，半塔型以及箱型等多种；而按锅炉蒸发受热面内工质流动方式则有自然循环锅炉、控制循环锅炉、直流锅炉以及复合循环锅炉等。

亚临界参数自然循环锅炉大多采用 II 型布置。

自然循环锅炉是蒸发受热面（水冷壁）内工质依靠下降管中的水与上升管中汽水混合物之间的密度差进行循环的锅炉，水从汽包流向下降管，下降管中的水是饱和水或达不到饱和温度的欠热水。水进入上升管后，因不断受热而达到饱和温度并产生部分蒸汽，成为汽水混合物。由于汽水混合物的密度小于下降管中水的密度，下集箱左右两侧将因密度差而产生压力差，推动上升管中的汽水混合物向上流动，进入汽包，并在汽包中进行汽水分离。分离出的汽由汽包上部送出，分离出的水则和由省煤器来的给水混合后流入下降管，继续循环，由此可知，自然循环的推动力是由下降管的工质柱重和上升管的工质柱重之差产生的。

随着压力的提高，饱和水和饱和汽的密度差逐渐减少，到临界压力，其密度差将为零，自然循环的推动力，即运动压头也随压力提高而逐渐减弱。到达一定压力后，所产生的运动压头就不足以维持水的自然循环，即不能采用自然循环了。如果只单纯依靠汽水的密度差，自然循环只能用于压力小于 16MPa 的锅炉。但因自然循环的运动压头不但与汽水的密度差有关，而且与循环高度和上升管中汽水混合物的含汽率有关，现代大型煤粉锅炉的高度很大，配 300MW 发电机组锅炉的循环回路高度可达 60m，而且上升管的含汽率也较大，所以在汽包压力为 19MPa 时仍能保证自然循环的安全性。

自然循环锅炉有以下的特点：

- (1) 最主要的特点是有个汽包，锅炉蒸发受热面通常就是由许多管子组成的水冷壁。
- (2) 汽包是省煤器、过热器和蒸发受热面的分隔容器，所以给水的预热、蒸发和蒸汽过热等各个受热面有明显的分界。汽水流动特性相应比较简单，容易掌握。
- (3) 汽包中装有汽水分离装置，从水冷壁进入汽包的汽水混合物既在汽包中的汽空间，也在汽水分离装置中进行汽水分离，以减少饱和蒸汽带水。
- (4) 锅炉的水容量及其相应的蓄热能力较大，因此当负荷变化时，汽包水位及蒸汽压力的变化速度较慢，对机组调节的要求可以低一些。但由于水容量大，加上汽包壁较厚，因此在锅炉受热或冷却时都不易均匀，使锅炉的启、停速度受到限制。
- (5) 水冷壁管子出口的含汽率相对较低，可以允许稍大的锅水含盐量，而且可以排污，

因而对给水品质的要求可以低些。

(6) 汽包锅炉的金属消耗量较大，成本较高。

国产引进型的亚临界压力锅炉常用这种型式。

下面以上海锅炉厂生产的 SG-1025/18.1-M 319 型锅炉为例加以说明。这类锅炉是上海锅炉厂在国产 300MW 直流锅炉和从美国燃烧工程公司引进的 300MW 控制循环锅炉的设计、制造和运行经验基础上发展起来的，也是在总结了该厂原生产的 SG-1025/15.7-M 315 型亚临界参数自然循环锅炉的基础上，经过改进设计而成的系列产品之一。

一、锅炉的技术规范

SG-1025/18.1-M 319 型锅炉的主要设计参数列于表 1-3 中，设计燃料是晋东南贫煤和无烟煤的混合煤，混合煤实质属于烟煤中的贫煤。为了扩大锅炉对煤种的适应范围，在锅炉设计时还考虑了 A、B 两种校核煤种，这两种校核煤种均属于无烟煤。设计煤种及校核煤种的特性列于表 1-4 中。

表 1-3 SG-1025/18.1-M 319 型锅炉的主要设计参数

名 称		单 位	锅炉最大连续出力 (B-MCR)	锅炉额定出力 (100 %)
过热蒸汽	蒸汽流量	t/h	1025	918.4
	出口蒸汽压力	MPa	18.1	17.2
	出口蒸汽温度	℃	541	541
再热蒸汽	蒸汽流量	t/h	834.1	754.4
	蒸汽压力，出口/进口	MPa	3.63/3.83	3.26/3.44
	蒸汽温度，出口/进口	℃	541/321	541/317
给水温度		℃	281	274

表 1-4 设计及校核燃料成分及特性分析

项 目		符 号	单 位	设计燃料	校核燃料 A	校核燃料 B
收到基低位发热量		$Q_{ar,net}$	kJ/kg	23405	24703.3	24703.3
工业分析	收到基全水分	M_{ar}	%	6.33	6.10	6.39
	空气干燥基水分	M_{ad}	%	1.67	1.79	1.60
	收到基灰分	A_{ar}	%	22.70	18.97	20.25
	干燥无灰基挥发分	V_{daf}	%	11.87	7.16	9.07
元素分析	收到基碳	C_{ar}	%	63.36	68.03	66.36
	收到基氢	H_{ar}	%	2.55	2.32	2.55
	收到基氧	O_{ar}	%	3.68	3.32	3.08
	收到基氮	N_{ar}	%	0.94	0.94	0.94
	收到基硫	S_{ar}	%	0.44	0.32	0.43
可磨性系数		K		1.08	0.97	1.02

二、锅炉的主要热力特性

在使用设计燃料时，锅炉的主要热力特性列于表 1-5 中。