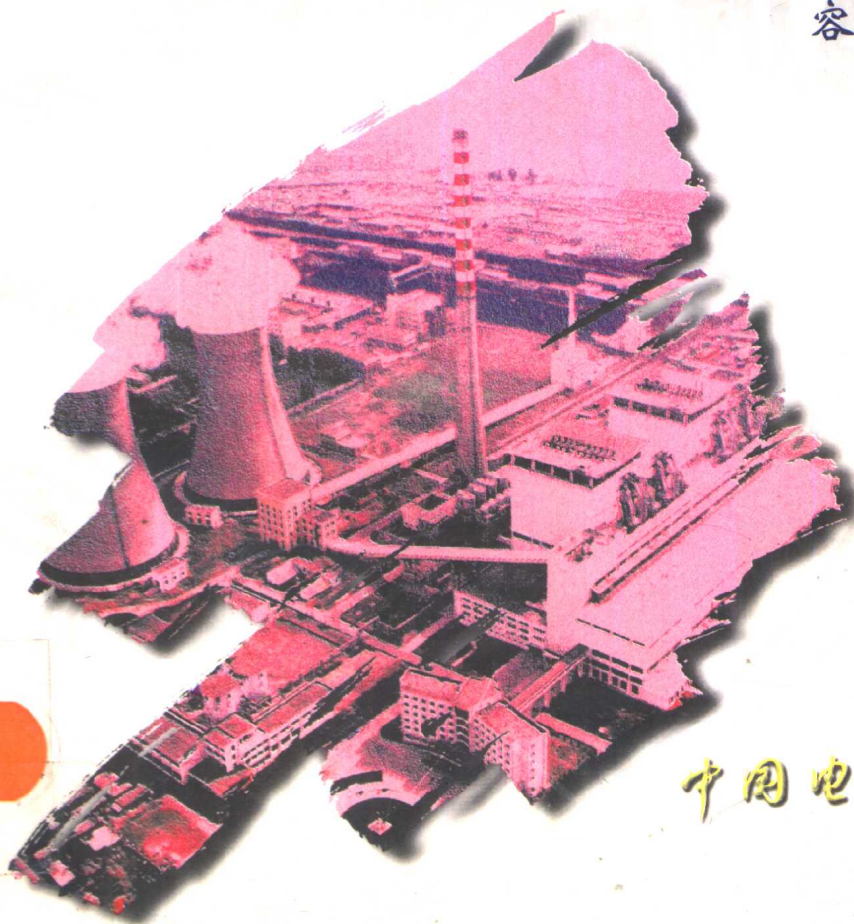


300MW火力发电机组丛书

第一分册

燃煤锅炉机组

容奎恩 主编



中国电力出版社

300MW火力发电机组丛书

第一分册

燃煤锅炉机组

容奎恩 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是《300MW 火力发电机组丛书》的第一分册。它在扼要叙述基本理论的基础上,系统地阐述了 300MW 机组的三种典型锅炉,即自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉的总体布置,汽包、燃烧器、过热器、再热器、省煤器、空气预热器、汽包内部装置等各种部件的结构和系统,以及各种辅助系统及安全保护部件的功能,也介绍了风机和电除尘器的结构和系统,最后,较详细地介绍了大容量锅炉的运行及故障预防和处理。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/容奎恩主编.-北京:中国电力出版社,1998

(300MW 火力发电厂机组丛书:第一分册)

ISBN 7-80125-702-2

I. 燃… II. 容… III. ①火电厂-发电机-机组②火电厂-燃煤锅炉 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 10618 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>)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 557 千字

印数 0001—3080 册 定价 28.50 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》编委会

主 编 吴季兰

副主编 容奎恩 涂光瑜 高 伟

编 委 (按姓氏笔划排序)

丁学俊	尹项根	叶 涛	刘 沛	许继刚
冯慧雯	李树人	吴季兰	吴胜春	陆继明
张永立	张国强	张晓梅	张家琛	涂光瑜
胡能正	高 伟	栾庆富	容奎恩	徐明厚
黄树红	熊信根			

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,以及高等院校热能动力类和电力工程专业师生参考。

《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釜恩主编。参加编写的人员有容釜恩(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

ABD75/03

敬告读者

感谢您购买本书！倘若您对本书有任何意见和建议，真诚欢迎来信或来电。

我们更期待着，今天您是我们的读者，明天您将成为我们的作者。

我们的联系地址和电话：

北京市西城区三里河路6号 100044

中国电力出版社热力编辑室

(010) 68358031-358.355 (电话)

(010) 68358031-358 (传真)

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 大型锅炉机组的作用和要求	1
第二节 300MW 火力发电机组中锅炉的容量、参数及型式	2
第三节 锅炉的安全及经济性指标	10
第二章 300MW 机组锅炉的总体布置	12
第一节 Π 形亚临界参数自然循环锅炉的总体布置	12
第二节 Π 形亚临界参数控制循环锅炉的总体布置	33
第三节 半塔式苏尔寿盘旋管直流锅炉的总体布置	43
第四节 国外大型电站锅炉总体结构特点	51
第三章 燃料燃烧和燃烧设备	57
第一节 锅炉燃料的成分和主要特性	57
第二节 煤粉气流的着火和燃烧	68
第三节 煤粉锅炉的燃烧设备	74
第四节 旋流燃烧器	75
第五节 直流燃烧器	77
第六节 W 形火焰燃烧方式	89
第七节 燃用劣质煤的有效措施	92
第八节 煤粉炉的点火装置	94
第四章 煤粉制备	98
第一节 煤粉的性质	98
第二节 煤的可磨性系数和磨损指数	101
第三节 300MW 锅炉机组常用的磨煤机	102
第四节 制粉系统及其主要部件	122
第五章 蒸发受热面及其工作特性	132
第一节 自然循环与水冷壁	132
第二节 亚临界压力自然循环特性	141
第三节 不稳定工况对锅炉水循环的影响	147
第四节 强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性及传热恶化	148
第五节 直流锅炉蒸发受热面	157
第六节 控制循环锅炉蒸发受热面	161
第六章 汽包及汽包内部装置	168
第一节 汽包	168
第二节 蒸汽净化及汽包内部装置	170
第三节 300MW 机组锅炉典型的汽包与汽包内部装置	178
第七章 过热器与再热器	184

第一节	概述	184
第二节	300MW 机组锅炉过热器、再热器结构特点	186
第三节	影响汽温变化的因素	203
第四节	蒸汽温度的调节	204
第五节	过热器的热偏差	210
第八章	省煤器和空气预热器	216
第一节	尾部受热面概述	216
第二节	省煤器	217
第三节	空气预热器	226
第四节	尾部受热面的积灰	240
第五节	低温受热面的低温腐蚀	242
第六节	低温受热面的飞灰磨损	245
第九章	除尘与除灰系统	248
第一节	概述	248
第二节	静电除尘器	248
第三节	阴极系统	251
第四节	阳极系统	258
第五节	槽型极板系统	262
第六节	烟箱	264
第七节	储灰系统	266
第八节	吹灰系统及其运行	268
第九节	灰渣系统及其运行	273
第十章	锅炉机组用风机	278
第一节	轴流式送风机	278
第二节	轴流式与离心式引风机及离心式一次风机	282
第三节	轴流式送风机与引风机的结构及制造特点	288
第四节	动叶片液压调节机构的工作原理	290
第五节	风机油系统及其保护装置	295
第六节	风机的其他技术特点	300
第七节	风机的运行与维护	302
第十一章	锅炉的启动	307
第一节	单元机组的联合启动	307
第二节	锅炉的启动过程	309
第三节	锅炉启动过程的安全监护	317
第十二章	锅炉的运行调整	325
第一节	锅炉运行调整的任务	325
第二节	锅炉工况变动的影响	325
第三节	负荷分配、汽压变化与调整	330
第四节	蒸汽温度的控制与调节	334
第五节	锅炉燃烧的调整	339
第六节	汽包水位的控制与调整	345
第七节	单元机组的变压运行	349

第十三章 锅炉的停炉及保养	352
第一节 锅炉的停运	352
第二节 单元机组的滑参数停运	354
第三节 锅炉停炉期间的保养	355
第十四章 锅炉的运行故障及其防治	359
第一节 制粉系统的故障及其处理	359
第二节 锅炉灭火与烟道再燃烧	363
第三节 锅炉的结渣	366
第四节 省煤器管的爆漏及其防治	374
第五节 过热器管和再热器管的爆漏及其防治	378
第六节 水冷壁管的爆漏及其防治	381
参考文献	385

第一章 概 论

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，许多新建的大型火力发电厂都安装有这种机组，机组中有国产的，有引进型的，也有进口的。

火力发电厂的生产过程，实际上就是将一次能源（煤、油及气体等燃料）转化为二次能源（电力）的能量转换过程。锅炉是火力发电厂三大主要设备之一，它的作用是将水变成高温高压的蒸汽。

水要变成高温高压的蒸汽，必须吸热，它的热源来自燃料。燃料在空气帮助下才能燃烧、发热，燃料燃烧后生成高温的燃烧产物（烟气），这个过程就是把燃料的化学能转化为烟气的热能。然后烟气通过锅炉的各种受热面，将这些热能传给水，水吸热后便变成蒸汽。由此可见，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。

锅炉本体是由汽包（或锅筒）、受热面及其间的连接管道（包括烟道和风道）、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，即组成所谓锅炉机组才行。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。每个辅助系统中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。电业事故是国民经济建设、工农业生产的一大灾害，发电厂事故停电，不仅使电厂本身遭受损失，而且对社会主义建设事业以及人民生活 and 生命安全都有着直接影响。而在火力发电厂的事故中，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% 左右，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、风机震动、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。同时，火力发电厂又是耗费一次能源的大户，必须重视节约能源，亦即必须提高锅炉运行的经济性。要在安全稳发的前提下，尽量提高经济性。

第二节 300MW 火力发电机组中锅炉的容量、参数及型式

一、容量

大型锅炉的容量，即锅炉蒸发量，分为额定蒸发量和最大连续蒸发量（B-MCR）两种。额定蒸发量是蒸汽锅炉在额定蒸汽参数、额定给水温度、使用设计燃料并保证效率时所规定的蒸发量，单位是 t/h。最大连续蒸发量（B-MCR）是蒸汽锅炉在额定蒸汽参数、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，单位是 t/h。

在我国的 300MW 火力发电机组中，锅炉常用亚临界参数。国内某些火力发电厂的锅炉额定蒸发量和最大连续蒸发量如表 1-1 所示。

表 1-1 国内某些 300MW 火电厂的锅炉容量

厂 名	额定蒸发量 (t/h)	最大连续蒸发量 (t/h)	最大连续蒸发量/额定蒸发量
武汉某厂	918.41	1025	1.116
湖北某厂	922.3	1025.7	1.112
广东某厂	931.8	1025	1.100
河南某厂	918.3	948.3	1.033

最大连续蒸发量通常为额定蒸发量的 1.03~1.2 倍，国产及引进型机组为偏大值，而进口机组常为偏小值。

二、蒸汽参数

额定蒸汽压力和额定蒸汽温度合称为额定蒸汽参数。额定蒸汽压力是锅炉在规定的给水压力和负荷范围内长期连续运行时应予以保证的蒸汽压力，而额定蒸汽温度是蒸汽锅炉在规定负荷范围、额定蒸汽压力和额定给水温度下长期连续运行所必须保证的出口蒸汽温度。我国的 300MW 火力发电机组的锅炉，绝大多数采用亚临界参数，只有极少数采用超临界参数。

锅炉出口蒸汽压力超过临界压力 22.1MPa 的锅炉，称为超临界压力锅炉，而出口蒸汽压力为 15.7~19.6MPa（表压）的锅炉称为亚临界压力锅炉。按我国电站锅炉现行规定的蒸汽参数系列，亚临界压力锅炉的出口蒸汽压力规定为 16.7MPa（表压）。

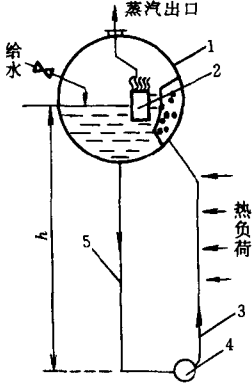


图 1-1 简单的自然循环回路
1—汽包；2—汽水分离器；3—上升管；4—下集箱；5—下降管

亚临界压力锅炉都采用中间过热，即都装设有再热器，其额定出口蒸汽温度包括额定过热蒸汽温度和额定再热蒸汽温度。我国自行设计的 300MW 亚临界压力锅炉常用两种额定蒸汽温度：555/555 和 570/570，前者温度下的锅炉最大连续蒸发量为 1000t/h 左右，后者温度下为 935t/h 左右。

三、锅炉蒸发受热面内工质的流动方式

亚临界压力锅炉按蒸发受热面内工质流动方式可以分为：

- 1. 自然循环锅炉

锅炉蒸发受热面（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，称为自然循环锅炉。国产引进型的亚临界压力锅炉常用这种型式。图 1-1 为简单的自然循环回路图，包括有受热的上升管和不受热的下降

管，上升管和下降管的上下两端分别与汽包和下集箱连接成密闭的循环回路。

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，分离出的水则由省煤器来的给水混合后流入下降管，继续循环，这便是自然循环原理。

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。自然循环回路的循环推动力称为运动压头 S_{yd} ，并用下式计算：

$$S_{yd} = h\rho_{xj}g - \sum h_i \bar{\rho}_i g \quad (1-1)$$

式中： h 为循环回路高度（从下集箱中心线到汽包的蒸发表面）； h_i 为上升管各区段高度； $\bar{\rho}_i$ 为上升管各区段内工质的平均密度； ρ_{xj} 为下降管中工质密度。

运行压头 S_{yd} 用于克服下降管阻力、上升管阻力以及汽包内的汽水分离装置的流动阻力，以使汽水能在循环回路内流动，即

$$S_{yd} = \Delta p_{xj} + (\Delta p_s + \Delta p_{fl}) \quad (1-2)$$

式中： Δp_{xj} 为下降管阻力损失； Δp_s 为上升管阻力损失； Δp_{fl} 为汽水分离器中的阻力损失。

因此，自然循环的推动力，即运动压头取决于饱和水密度、饱和汽密度、上升管含汽率以及循环回路高度等。

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，所以自然循环的推动力，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，自然循环只能用在压力 $p \leq 16\text{MPa}$ 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) 最大的特点是有一个汽包，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。

2. 强制循环锅炉

蒸发受热面内的工质除了依靠水与汽水混合物的密度差以外，主要依靠锅水循环泵的压头进行循环的锅炉，称为强制循环锅炉，又称辅助循环锅炉。在水冷壁上升管入口处加装节

流圈的大容量强制循环锅炉，又称为控制循环锅炉。

强制循环锅炉是在自然循环锅炉基础上发展起来的，因此，在结构和运行特性等许多方面都与自然循环锅炉有相似之处。强制循环锅炉也有汽包，其主要差别是：自然循环主要依靠汽水密度差使蒸发受热面内工质自然循环，随着工作压力的提高，水汽密度差减少，自然循环的可靠性降低；但强制循环锅炉，由于主要依靠锅水循环泵使工质在水冷壁中作强迫流动，不受锅炉工作压力的影响，既能增大流动压头，又能控制各个回路中的工质流量。

强制循环锅炉虽然比自然循环锅炉只多用了几个锅水循环泵，但用了循环泵，可以给锅炉的结构和运行带来一系列重大的变化。在结构上，蒸发受热面就不一定采用垂直上升的型式；运行上由于在低负荷或启动时可以利用水的强制流动，使各承压部件得到均匀加热，因此可以大大提高启动及升、降负荷时的速度。

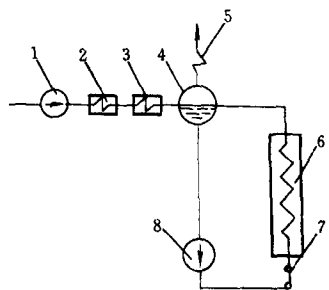


图 1-2 控制循环锅炉示意图

1—给水泵；2—加热器；3—省煤器；
4—汽包；5—过热器；6—水冷壁；
7—节流圈；8—循环泵

图 1-2 为控制循环锅炉的示意图。从图 1-2 可以看出，控制循环锅炉蒸发系统的流程是：水从汽包通过集中下降管后，再经循环泵送进水冷壁下集箱，再进入带有节流圈的膜式水冷壁，受热后的汽水混合物最后进入汽包。

由此可以知道，强制循环锅炉（包括控制循环锅炉）有以下特点：

- (1) 由于装有循环泵，其循环推动力比自然循环大好几倍。自然循环产生的运动压头一般只有 $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ，而强制循环则可达 $0.25 \sim 0.5 \text{ MPa}$ ，因此可用小直径管作为水冷壁管。小直径管在同样压力下所需的管壁较薄，金属消耗量较少。
- (2) 可任意布置蒸发受热面，管子直立、平放都可以，因此锅炉的形状和受热面都能采用比较好的布置方案。
- (3) 循环倍率较低。因为循环倍率的大小与水冷壁的冷却有直接关系，循环倍率大则安全，但不经济（因会使循环泵流量大，消耗功率大）。由于强制循环锅炉可以使用小直径管子，管壁薄，壁温较低，如果采用较高流速 [一般 $\rho\omega = 1000 \sim 1500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]，则循环倍率可取得小一些（一般取循环倍率 $K = 3 \sim 5$ ）。
- (4) 由于循环倍率小，循环水流量较小，可以采用蒸汽负荷较高、阻力较大的旋风分离装置，以减少分离装置的数量和尺寸，从而可采用较小直径的汽包。
- (5) 蒸发受热面中可以保持足够高的质量流速，而使循环稳定，不会使受热弱的管子发生循环停滞或倒流等循环故障。而且大容量强制循环锅炉的水冷壁管子进口处一般都装有节流圈（即为控制循环锅炉），这又是避免出现水动力的多值性、脉动现象、停滞、倒流或过大的受热偏差的有效措施。
- (6) 一台强制循环锅炉一般装设循环泵 $3 \sim 4$ 台，其中一台备用。运行时循环泵所消耗的功率一般为机组功率的 $0.2\% \sim 0.25\%$ 。
- (7) 调节控制系统的要求比直流锅炉低。
- (8) 锅炉能快速启停。由于循环系统的管子金属壁较薄，热容量小，在加热或冷却过程中温度易于趋向均匀，启动时汽包壁温升允许值一般可达 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ （自然循环锅炉则为 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ ）。而且强制循环锅炉在点火前已开始启动循环泵，建立正常循环系统，所以可以缩短

启动时间。

(9) 其缺点是由于循环泵的采用,增加了设备的制造费用,而且循环泵长期在高压、高温(250~300℃)下运行,需用特殊材料,才能保证锅炉运行的安全性。

3. 直流锅炉

给水靠给水泵压头在受热面中一次通过,产生蒸汽的锅炉称为直流锅炉。

直流锅炉的特点是没有汽包,整台锅炉由许多管子并联,然后用集箱串联连结而成。在给水泵压头的作用下,工质顺序一次通过加热、蒸发和过热受热面,进口工质为水,出口工质是过热蒸汽。由于工质的运动是靠给水泵的压头来推动的,所以在直流锅炉中,一切受热面中工质都是强制流动的。

直流锅炉由于取消了汽包,其工作过程有如下特点:

(1) 由于没有汽包进行汽水分离,也就是蒸发受热面和过热器没有中间分隔容器隔开,因此水的加热、蒸发和过热的受热面没有固定的分界;过热度往往也随着负荷的变动而波动较大。

(2) 由于没有汽包,直流锅炉的水容积及其相应的蓄热能力大为降低,一般约为同参数汽包锅炉的50%以下,因此,对锅炉负荷变化比较敏感,锅炉工作压力变化速度也比较快。若燃料、给水等供应比例失调,就不能保证产生合乎要求的蒸汽,这就要求直流锅炉有更灵敏的调节控制手段。

(3) 在直流锅炉中,蒸发受热面不构成循环,无汽水分离问题,因此,当工作压力增高,汽水密度差减小时,对蒸发系统工质的流动并无影响,所以在超临界压力以上时,直流锅炉仍能可靠地工作。

(4) 由于没有汽包,直流锅炉一般不能连续排污,给水带入锅炉的盐类,除了蒸汽带去的一部分外,其余都将沉积在受热面管子中,因此,直流锅炉对给水品质的要求很高。

(5) 由于没有汽包,热水段、蒸发段和过热段没有固定的分界,同时因为汽、水比容不同,在直流锅炉蒸发受热面中会出现一些流动不稳定、脉动等问题,会直接影响锅炉的安全运行。

(6) 在直流锅炉的蒸发受热面中,水从开始沸腾一直到完全蒸发,都是在高压、高含汽率的条件下进行的,锅炉蒸发受热面管内的换热就可能处于膜态沸腾状态下,这时受热面的金属壁温就会急剧升高,工作不安全,因此,防止膜态沸腾,将是直流锅炉设计和运行中必须注意的问题。

(7) 在直流锅炉中,蒸发受热面中的汽水流动不像自然循环锅炉那样靠工质压差自然循环,不消耗水泵压头,而是完全靠给水泵压头推动汽水流动,故要消耗较多的水泵功率。一般汽包锅炉的汽水阻力为1~2MPa,而直流锅炉则为3~5MPa。

(8) 启动时,自然循环锅炉中的蒸发受热面靠锅水的自然循环而得到冷却。在直流锅炉中,则要有专门的系统和启动分离器,以便在启动时有足够的水量通过蒸发受热面,以保护受热面管子不致被烧坏。

(9) 由于没有汽包,又不用或少用下降管,因而可节省钢材20%~30%(与汽包锅炉相比)。同时,直流锅炉的制造工艺比较简单,运输安装也比较方便。

(10) 由于没有厚壁的汽包,在启、停过程中,锅炉各部分的加热和冷却都容易达到均匀,所以启动和停炉的速度都较快。冷炉点火后约40~45min就可供给额定压力和温度的蒸

汽。而一般自然循环锅炉升火大约要 2~4h，停炉则需 18~24h。

(11) 由于直流锅炉的工质是强制流动的，因而蒸发受热面可以任意布置，不必受自然循环锅炉必须的上升、下降管直立布置的限制，因而容易满足炉膛结构的要求。

4. 复合循环锅炉

复合循环锅炉是由直流锅炉和强制循环锅炉综合而发展来的，是直流锅炉的改进。

依靠锅水循环泵的压头，将蒸发受热面出口的部分或全部工质进行再循环的锅炉，称为复合循环锅炉。它包括全负荷复合循环锅炉和部分负荷复合循环锅炉两种。

全负荷复合循环锅炉常用于亚临界压力，其蒸发系统在整个负荷范围内都实行工质再循环，故称全负荷复合循环锅炉。由于在额定负荷时，它的循环倍率只有 1.2~2.0，故又称为低循环倍率锅炉。随着锅炉负荷降低，其循环倍率增大。我国元宝山电厂配 300MW 的亚临界压力机组的锅炉便是这种型式。

而部分负荷复合循环锅炉是指其蒸发系统在部分负荷（即低负荷）时，按再循环原理工作，但在高负荷时，则按纯直流原理工作。从纯直流工况切换到再循环工况时的负荷，要根据不同情况而定，一般在额定负荷的 65%~80%之间，锅炉容量大的可取低值。这种型式多用于超临界压力锅炉。

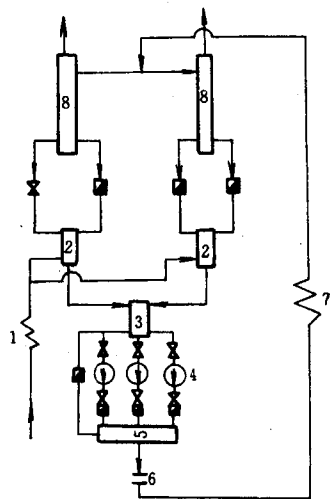


图 1-3 亚临界压力的全负荷复合循环锅炉的蒸发系统示意图

1—省煤器；2—混合器；3—过滤器；4—循环泵；5—分配器；6—节流圈；7—水冷壁；8—汽水分离器

亚临界压力的全负荷复合循环锅炉的蒸发系统示意图见图 1-3。从图 1-3 可看出，亚临界压力全负荷复合循环锅炉蒸发系统的流程是：给水经省煤器 1 进入混合器 2，与由分离器 8 分离出的锅水混合，经过滤器过滤后，通过循环泵 4，经分配器 5 输送至水冷壁 7 的各个回路中。水冷壁的各个回路管子上都装有节流圈 6，以合理分配各个回路的水量。水冷壁产生的汽水混合物在分离器 8 中进行汽水分离，分离出来的蒸汽送往过热器，分离出来的水则送回混合器，进行再循环。循环泵一般装 2~4 台，其中一台备用。当运行的循环泵发生故障时，备用泵便立即投入。在切换过程中，给水经备用管直接进入水冷壁，以确保锅炉的连续安全工作。

给水泵与循环泵可以串联工作，如图 1-3 所示，也可以并联工作，但一般常用串联。因为如果用并联系统，即给水泵与循环泵并联工作，循环泵吸入的是饱和温度的锅水，对循环泵的要求很高，否则会影响工作的安全。而在串联系统中，循环泵吸入的是给水和锅水的混合物，其温度总是低于饱和温度，循环泵的工作比较安全。

全负荷复合循环锅炉也可用于超临界压力，其系统图见图 1-4。系统中取消了汽水分离器，因而也只适用于超临界压力。

全负荷复合循环锅炉对循环泵的特性有一定的要求，即要求循环泵在各种流量下，其压头变化不大，以便在整个锅炉负荷范围内，使流经水冷壁的工质流量大致不变，如图 1-5 所示。

由图 1-5 可知，由于全负荷复合循环锅炉在各种负荷时水冷壁中工质流量变化不大，所以在额定负荷时，可以采用比直流锅炉低得多的质量流速，一般为 $\rho w = 1100 \sim 1600$

$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ [直流锅炉的质量流速高达 $\rho w = 2000 \sim 2500 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。在高负荷时,全负荷复合循环锅炉蒸发系统中的工质质量流速要比直流锅炉低得多,因此流动阻力相应要小得多。而在低负荷时,全负荷复合循环锅炉蒸发系统中的工质质量流速则较大,冷却条件又比直流锅炉好得多。

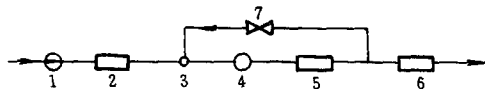


图 1-4 超临界压力全负荷复合循环锅炉循环系统示意图

1—给水泵；2—省煤器；3—混合器；4—循环泵；
5—水冷壁；6—过热器；7—止回阀

锅炉负荷变动时,给水流量、循环倍率以及分离器出口的蒸汽湿度均会发生变化。例如当负荷降低时,给水流量减少,但水冷壁管中工质流量减少不多,因而循环倍率增大,进入分离器的工质湿度也增大,但这时进入过热器的蒸汽湿度反而减少。这是因为锅炉负荷降低时,分离器的蒸汽负荷和工作压力相应降低,有利于汽水分离。全负荷复合循环锅炉分离器出口的蒸汽湿度这种变化,也使其汽温特性与其他型式锅炉不同。在低负荷时进入过热器的蒸汽带水少,对过热器的喷水量就要增加,在某一负荷下,喷水量达到最大值,低于这个负荷时,由于过热器的对流特性起主要作用,喷水量将随负荷的降低而减少。

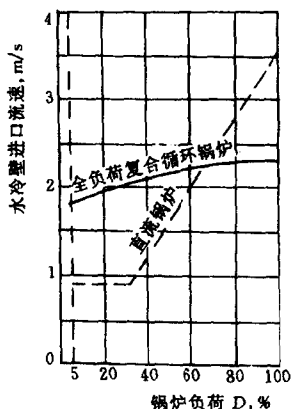


图 1-5 全负荷复合循环锅炉与直流锅炉的工质流速随负荷变化的情况

在运行中,分离器水位波动较大。尽管分离器高度很大,允许水位有较大幅度的波动,但也不能低于规定的最低水位。最大的水位波动发生在给水泵切换过程中,一般切换时间约为 $10 \sim 20 \text{s}$ 。循环泵的切换时间更短,仅约为 $3 \sim 5 \text{s}$,故对水位影响不大。

全负荷复合循环锅炉既有直流锅炉的特点,又有强制循环锅炉的特点,但是它没有大直径的汽包,只有小直径的汽水分离器,因此钢材消耗量较少。这种锅炉的循环倍率只有 $1.2 \sim 2.0$,而强制循环锅炉则为 $3 \sim 5$,因此,循环泵的功率也较小。

由于有以上特点,全负荷复合循环锅炉最适合用于容量为 $300 \sim 600 \text{MW}$ 的机组。

至于部分负荷复合循环锅炉,则多用于超临界压力的大容量锅炉。图 1-6 为超临界压力的部分负荷复合循环锅炉的循环系统图,如图所示,系统中装有两台循环泵,其中一台作备用。由省煤器来的给水经 $2 \sim 3$ 根连接管送入球形混合器。当负荷低于切换负荷时,给水在此与水冷壁出口的锅水混合,混合后由循环泵升压,流入球形分配器内,由此经分配管送至水冷壁的下集箱。为减少水冷壁的热偏差,这些集箱分隔成几段,每段与球形分配器上的 $1 \sim 2$ 根分配管相连,形成各个单独回路,在球形分配器的分配管管座上开有节流小孔,按炉膛受热面热负荷分布情况来分配各回路的水流量。在再循环系统内装有循环限制阀,当锅炉按再循环工况运行时,此阀用以调节循环水流量;而当锅炉按直流工况运行时,再循环系统停止工作,此阀可起到严密断开的作用,这时循环泵仅起升压作用,或者也可以停用循环泵,使给水经旁路直接进入水冷壁。

综合起来,复合循环锅炉有以下的特点:

- (1) 需要有能长期在高温高压下运行的循环泵。
- (2) 锅炉汽水系统的压降小,与直流锅炉相比,能节省给水泵能量消耗。这主要由于在

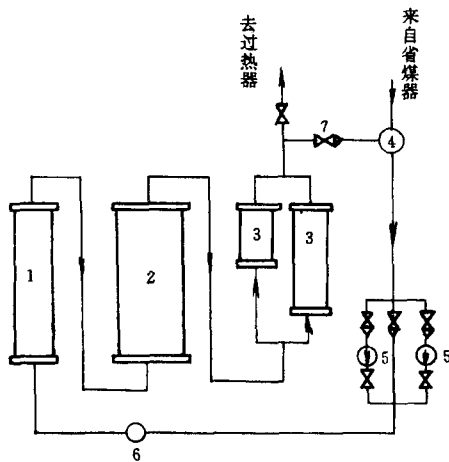


图 1-6 超临界压力的部分负荷复合循环锅炉的循环系统

1—双面爆光水冷壁；2—水冷壁；3—对流井包覆管；
4—混合球；5—循环泵；6—分配球；7—循环限止阀

高负荷时可以选用较低的质量流速，而在低负荷时则利用循环泵来得到足够的质量流速。

(3) 锅炉运行时的最低负荷几乎没有限制，而一般直流锅炉的最低负荷往往限制在额定负荷的 20%~30% 内。同时，由于在低负荷时，复合循环锅炉没有旁路系统的热损失，减少了机组热效率的降低。

(4) 炉膛水冷壁内工质流动可靠，很少产生故障，因此，在各种负荷下水冷壁烧坏爆管的可能性很小。

(5) 旁路系统简化，使机组启动时的热损失较小。这是由于锅炉启动时用锅水再循环系统来保持水冷壁内工质有足够的质量流速，此时锅炉给水量只有最大蒸发量的 5%~10%，因而启动热损失很小，仅为直流锅炉启动热损失的 15%~25%。

由此可见，复合循环锅炉有许多优点，如果循环泵能保证在高温高压下工作可靠，那么，复合循环锅炉是适用于亚临界压力和超临界压力的一种比较理想的锅炉型式。

四、大型锅炉本体布置型式

锅炉本体的布置型式是指锅炉炉膛和炉膛中的辐射受热面与对流烟道和其中的各种对流受热面之间的相互关系及相对位置，锅炉本体的布置型式既与锅炉的容量、参数有关，又与锅炉所用的燃料性质以及钢材、地皮相对价格有关。由于具体条件不同，会有许多不同的布置型式。

大型锅炉常见的本体布置型式有以下几种：

1. Π 形布置

在燃用煤粉的自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉中，广泛采用这种布置型式。它是用炉膛组成上升烟道，用对流烟道组成水平烟道和垂直下降烟道的锅炉布置型式，如图 1-7 (a) 所示。Π 形布置的主要优点是：

(1) 锅炉的排烟口在下部，因此，转动机械和笨重设备，如送风机，引风机及除尘器都可布置在地面上，可以减轻厂房和锅炉构架的负载。

(2) 锅炉及厂房的高度较低。

(3) 在水平烟道中可以采用支吊方

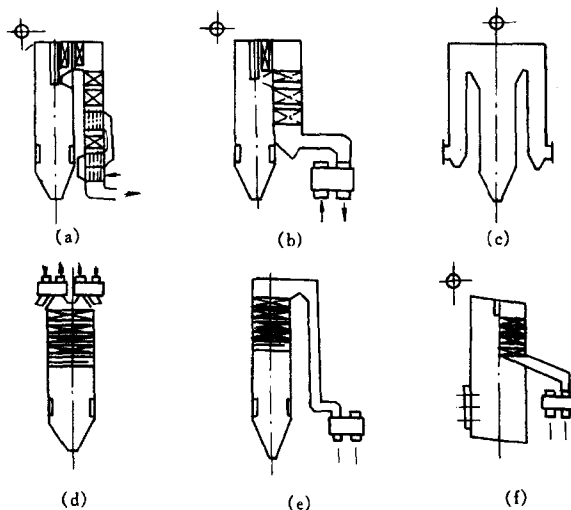


图 1-7 锅炉本体的典型布置

(a) Π 形；(b) Γ 形；(c) T 形；(d) 塔形；
(e) 半塔形；(f) 箱形