



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

锅炉设备及运行

姜锡伦 屈卫东 主编



中国电力出版社

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



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

锅炉设备及运行

主编 姜锡伦 屈卫东
编写 侯俊凤 杨宏民
主审 刘 彤 石晓峰



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力高等职业教育规划教材。

主要内容包括锅炉基础知识、锅炉燃料、锅炉物质平衡和热平衡、煤粉制备、燃烧原理及设备、自然循环蒸发设备及蒸汽净化、过热器与再热器、省煤器和空气预热器、强制流动锅炉及其水动力特性、锅炉的启动和停运、锅炉机组的运行与调节及锅炉事故等。

本书可作为高等职业教育电力技术类专业教学用书,也可以作为学历教育教学用书和职业资格及岗位技能培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备及运行/姜锡伦,屈卫东主编. —北京:中国电力出版社, 2005

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3625-9

I. 锅... II. ①姜... ②屈... III. 火电厂—锅炉—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 110572 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

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 412 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 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

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007 年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，同意列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书共分十二章，其中第一章、第七章~第九章由郑州电力高等专科学校屈卫东编写；第二章~第四章由郑州电力高等专科学校侯俊凤编写；第五章和第六章由郑州电力高等专科学校杨宏民编写；第十章~第十二章由郑州电力高等专科学校姜锡伦编写。

本书由姜锡伦、屈卫东担任主编，姜锡伦负责全书的统稿工作。

本书由华北电力大学教授刘彤和大唐首阳山发电厂总工程师石晓峰担任主审，二位审稿人提出的许多宝贵意见使本书更臻完善。同时，本书在编写过程中，参考了有关兄弟院校和企业的诸多文献、资料，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中疏漏与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 6 月

目 录

前言

第一章 电站锅炉基础知识	1
第一节 电站锅炉的构成及工作过程	1
第二节 电站锅炉的规范、型号及安全指标	2
第三节 锅炉的分类	3
第四节 典型锅炉介绍	4
第二章 锅炉燃料	13
第一节 燃料介绍	13
第二节 煤的成分及其性质	13
第三节 煤的特性及分类	19
第四节 液体和气体燃料	24
第三章 锅炉物质平衡和热平衡	26
第一节 燃料燃烧所需空气量及过量空气系数	26
第二节 烟气成分及其烟气量的计算	28
第三节 燃烧方程式	33
第四节 根据烟气成分求过量空气系数及烟气焓	34
第五节 锅炉热平衡及其意义	39
第六节 锅炉正平衡求效率	41
第七节 锅炉反平衡求效率及各项热损失	42
第八节 锅炉燃料消耗量	47
第九节 锅炉机组热平衡试验方法	48
第四章 煤粉制备	51
第一节 煤粉的特性	51
第二节 煤的可磨性	55
第三节 磨煤机	56
第四节 制粉系统	66
第五节 制粉系统的部件	72
第五章 燃烧原理及设备	77
第一节 燃烧基本概念	77
第二节 煤粉气流的燃烧过程	81
第三节 煤粉燃烧器	87
第四节 煤粉炉及点火装置	97

第五节	循环流化床锅炉简介	105
第六章	自然循环蒸发系统及蒸汽净化	111
第一节	自然循环汽包锅炉的蒸发设备	111
第二节	自然循环的流动特性及安全性	115
第三节	蒸汽净化	122
第七章	过热器与再热器	133
第一节	过热器与再热器的工作特点	133
第二节	过热器与再热器的型式和结构	135
第三节	热偏差	141
第四节	汽温调节	148
第五节	过热器与再热器的烟气侧工作过程	154
第八章	省煤器和空气预热器	157
第一节	省煤器	157
第二节	空气预热器	161
第三节	尾部受热面的布置	165
第四节	尾部受热面的积灰、磨损和低温腐蚀	166
第九章	强制流动锅炉及其水动力特性	173
第一节	控制循环锅炉	173
第二节	直流锅炉	177
第三节	复合循环锅炉简介	179
第四节	强制流动特性	180
第十章	锅炉机组的启动和停运	183
第一节	锅炉机组运行概述	183
第二节	汽包锅炉的启动与停运	186
第三节	直流锅炉的启动与停运	208
第四节	锅炉的停用保护	215
第十一章	锅炉机组的运行与调节	217
第一节	汽包锅炉的变工况运行特性	217
第二节	锅炉的运行调节	225
第三节	直流锅炉的运行特点	234
第四节	单元机组变压运行	235
第十二章	锅炉事故	241
第一节	概述	241
第二节	汽包锅炉水位事故	241
第三节	锅炉受热面爆破事故	243
第四节	超临界压力直流锅炉水冷壁的安全运行	246
第五节	炉膛灭火爆炸事故	252
第六节	锅炉主要辅机的常见故障及处理	256
参考文献		263

电站锅炉基础知识

电力已经是国民经济和人民生活越来越重要的能源，电能的产生一般依赖于电站。目前大规模的发电方式主要有火力发电、水力发电和核能发电三种。火力发电是我国目前最主要的发电方式，其主要过程是由燃料的化学能转变为蒸汽的热能，然后由蒸汽的热能转变为汽轮机转动的机械能，最终将机械能通过发电机的励磁转变为电能。其中化学能转变为热能的过程是在锅炉内完成的。显然电站锅炉是火力发电厂的重要设备之一。

第一节 电站锅炉的构成及工作过程

锅炉设备一般是由锅炉本体和辅助设备组成的。锅炉本体主要包括燃烧器、炉膛、布置有受热面的烟道、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、省煤器及空气预热器等。辅助设备包括送风机、引风机、给煤机、磨煤机、排粉机、除尘器及烟囱等。

发电用的锅炉称为电站锅炉。燃煤粉的电站锅炉可用图 1-1 简要地说明其构成及工作过程。由输煤皮带运来的煤落到煤斗 13 中，经给煤机 14 送入磨煤机 15 磨制成粉后，被自热风管 12 来的热风送入粗粉分离器 16，在粗粉分离器中不合格的粗粉被分离出来，沿回粉

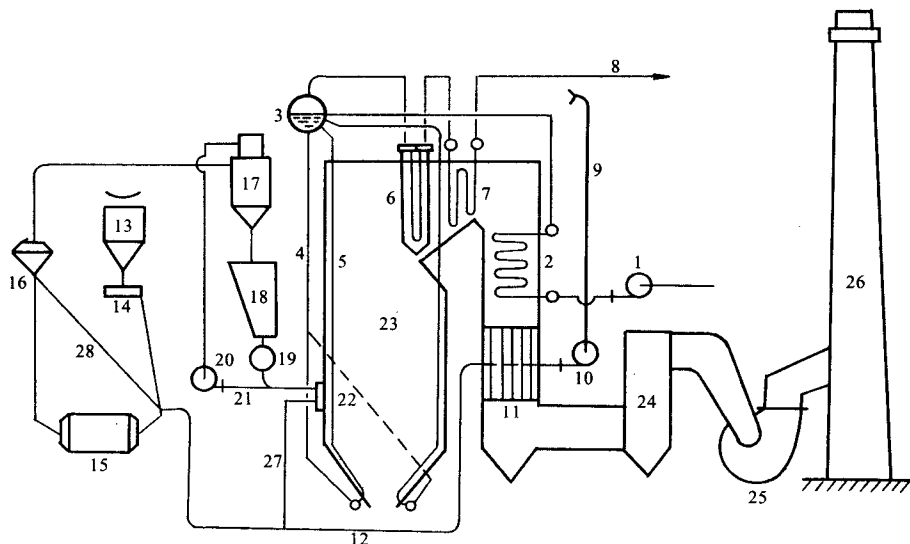


图 1-1 燃煤电站锅炉原理图

- 1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—水冷壁；6—屏式过热器；7—对流过热器；
8—主蒸汽管道；9—进风机抽风管；10—送风机；11—空气预热器；12—热风管；13—煤斗；
14—给煤机；15—磨煤机；16—粗粉分离器；17—继粉分离器；18—煤粉仓；19—给粉机；
20—排粉机；21—一次风管；22—燃烧器；23—炉膛；24—除尘器；25—引风机；26—烟囱；
27—二次风管；28—回粉管

管 28 再回到磨煤机重新磨制,合格的煤粉则沿管道被送到细粉分离器 17 中进行气粉分离,分离出的煤粉送入煤粉仓 18,并通过给粉机 19 按锅炉燃烧的需要送入一次风管 21 中,分离出的乏气被排粉机 20 抽走,并通过一次风管携带煤粉经由燃烧器 22 输送进入炉膛 23 燃烧,二次风自二次风管 27 经燃烧器同时吹入炉膛助燃。燃烧后的烟气经水平烟道、垂直烟道、除尘器 24、引风机 25 后,通过烟囱 26 排入大气。空气经抽风管 9、送风机 10、空气预热器 11、热风管 12 送入炉膛及制粉系统。以上所述煤、风、烟系统称为锅炉的燃烧系统,即一般说的“炉”。

给水经给水泵 1 送入省煤器 2 和汽包 3,然后进入下降管 4、水冷壁 5,水在水冷壁中加热后成为汽水混合物,又回到汽包并经汽、水分离,分离出的水继续进入下降管循环,分离出的饱和蒸汽离开汽包进入过热器系统。饱和蒸汽经顶棚过热器、屏式过热器 6 和对流过热器 7 升温后,通过主蒸汽管道 8 送入汽轮机做功。上述为汽水系统,即一般说的“锅”。

炉的任务是组织煤粉在炉膛内良好燃烧,尽可能多地放出热量,锅的任务是尽量把燃料燃烧放出的热量有效地吸收,锅和炉组成了一个完整的能量转换系统。

第二节 电站锅炉的规范、型号及安全指标

一、锅炉的规范

锅炉的主要技术规范是指锅炉容量、锅炉蒸汽参数和给水温度等,它们用来说明锅炉的基本工作特性。

1. 锅炉容量

指锅炉每小时的最大连续蒸发量,简称 MCR (maximum continuous rating),又称为锅炉的额定容量或额定蒸发量。常用符号 D_e 表示,单位为 t/h (或 kg/s)。例如 200MW 汽轮发电机组配用的锅炉容量为 670t/h。

锅炉容量是说明锅炉产汽能力大小的特性数据。

2. 锅炉蒸汽参数

通常是指锅炉过热器出口处的过热蒸汽压力和温度。蒸汽压力用符号 p 表示,单位为 MPa; 蒸汽温度用符号 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。例如 200MW 汽轮发电机组配用的超高压锅炉,其蒸汽压力为 13.73MPa (表压力),蒸汽温度为 540°C 。当锅炉具有中间再热时,蒸汽参数还应包括再热蒸汽压力和温度。

锅炉蒸汽参数是说明锅炉蒸汽规范的特性数据。

3. 给水温度

锅炉给水温度是指水在省煤器入口处的温度。不同蒸汽参数的锅炉其给水温度也不相同。

锅炉给水温度是说明锅炉给水规范的特性数据。

二、国产锅炉型号

锅炉型号反映锅炉的基本特征。我国锅炉目前采用三组或四组字码表示其型号。一般中、高压锅炉用三组字码表示。例如 HG-410/100-1 型锅炉,型号中第一组字码是锅炉制造厂名称的汉语拼音缩写, HG 表示哈尔滨锅炉厂 (SG 表示上海锅炉厂, WG 表示武汉锅炉厂, DG 表示东方锅炉厂, BG 表示北京锅炉厂); 型号中的第二组字码为一分数,分子表

示锅炉容量 (t/h)，分母表示过热蒸汽压力 ($\times 0.098\text{MPa}$ 或 kgf/cm^2 ，表压)；型号中第三组字母表示产品的设计序号，同一锅炉容量和蒸汽参数的锅炉其序号可能不同，序号数字小的是先设计的，序号数字大的是后设计的，不同设计序号可以反映出结构上的某些差别或改进。例如 HG-410/100-1 型与 HG-410/100-2 型锅炉的主要区别是：1 型为固态排渣、管式空气预热器、两段分段蒸发等；2 型为液态排渣、回转式空气预热器、无分段蒸发等。因此前述 HG-410/100-1 型锅炉即表示哈尔滨锅炉厂制造，容量为 410t/h，过热蒸汽压力为 9.8MPa (100kgf/cm^2 ，表压)，第一次设计制造的锅炉。

超高压以上的发电机组均采用蒸汽中间再热，即锅炉装有再热器，故用四组字母表示。即在上述型号的二、三组字母间又加了一组字母，该组字母也为一个分数，其分子表示过热蒸汽温度，分母表示再热蒸汽温度。例如 DG-670/140-540/540-5 型锅炉即表示东方锅炉厂制造，容量为 670t/h，过热蒸汽压力为 13.7MPa (140kgf/cm^2 ，表压)，过热蒸汽温度为 540℃，再热蒸汽温度为 540℃，第 5 次设计的锅炉。

三、锅炉运行的安全技术指标

锅炉运行时的安全性指标不能进行专门的测量，而用下列三个间接指标来衡量。

1. 连续运行小时数

锅炉的连续运行小时数是指两次检修之间的运行小时数，国内一般大、中型电站锅炉的平均连续运行小时数在 4000h 以上，而大型电站锅炉则应在 7000h 左右。

2. 事故率

事故率是指事故停用小时数占总运行小时数和事故停用小时数之和的百分比，即

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

3. 可用率

可用率是指总运行小时数和总备用小时数之和占统计期间总小时数的百分比，即

$$\text{可用率} = \frac{\text{总运行小时数} + \text{总备用小时数}}{\text{统计期间总小时数}} \times 100\%$$

锅炉的事故率和可用率可按一个适当长的周期来计算，我国火力发电厂通常以一年为一个统计周期。

目前国内一般比较好的安全技术指标是：事故率约为 1%，可用率约为 90%，另据国外有关统计资料表明，随着机组容量的增大，锅炉的可用率是下降的。

第三节 锅炉的分类

电站锅炉根据其工作条件、工作方式和结构型式不同，可有多种分类方法，现简要介绍如下。

一、按锅炉容量分

考虑现阶段我国锅炉工业发展情况，锅炉容量的划分是： $D_e < 220\text{t/h}$ 为小型锅炉； $D_e = 220 \sim 410\text{t/h}$ 为中型锅炉； $D_e > 670\text{t/h}$ 为大型锅炉。但上述分类是相对的，随着锅炉容量日益增大，目前的大型锅炉若干年后只能算中型。

二、按蒸汽压力分

$p \leq 1.27\text{MPa}$ (13kgf/cm^2) 为低压锅炉；

$p=2.45\sim3.8\text{MPa}$ ($25\sim39\text{kgf/cm}^2$) 为中压锅炉;

$p=9.8\text{MPa}$ (100kgf/cm^2) 为高压锅炉;

$p=13.7\text{MPa}$ (140kgf/cm^2) 为超高压锅炉;

$p=16.7\sim18.6\text{MPa}$ ($170\sim190\text{kgf/cm}^2$) 为亚临界压力锅炉;

$p\geq 22.1\text{MPa}$ (225.56kgf/cm^2) 为超临界压力锅炉。

三、按燃用燃料分

按燃用燃料分有燃煤炉、燃油炉、燃气炉。

四、按燃烧方式分

按燃烧方式分有层燃炉、室燃炉(煤粉炉、燃油炉等)、旋风炉、沸腾炉等。

层燃炉是指煤块或其他固体燃料在炉算上形成一定厚度的料层进行燃烧,通常把这种燃烧称为平面燃烧,如早期的链条炉,现在电站锅炉已不采用。

室燃炉是指燃料在炉膛(燃烧室)空间呈悬浮状进行燃烧,通常把这种燃烧称为空间燃烧,它是目前电厂锅炉的主要燃烧方式,也就是通常所说的煤粉锅炉。在煤粉锅炉中,燃烧方式目前主要采用三种技术:四角切向燃烧,对冲燃烧,W火焰燃烧。

旋风炉是一种以旋风筒作为主要燃烧室的炉子,粗煤粉(或煤屑)和空气在旋风筒内强烈旋转并进行燃烧。它基本上也属于空间燃烧,但其燃烧速度要比煤粉炉高得多,但主要针对特殊煤种而采用,通常采用液态排渣。

沸腾炉也称流化床锅炉,是指煤粒在炉算(布风板)上上下下翻腾,呈沸腾状态进行燃烧。这是一种平面与空间相结合的燃烧方式,这种炉子特别适宜于烧劣质煤。目前的流化燃烧已逐渐演变为循环流化床锅炉。

五、按工质在蒸发受热面中的流动特性即水循环特性分

按工质流动特性分有自然循环锅炉、强制流动锅炉。强制流动锅炉又分为控制循环锅炉、直流锅炉、复合循环或低倍率循环锅炉等。

自然循环锅炉有汽包,工质在蒸发受热面即水冷壁中的流动是依靠汽水密度差来进行的。控制循环锅炉也有汽包,工质在蒸发面中的流动依靠水泵的压头来进行。直流锅炉没有汽包,工质在蒸发受热面中的流动依靠水泵的压力来进行,且水在蒸发受热面中全部转变为蒸汽。复合循环锅炉是在直流锅炉的基础上发展起来的一种锅炉,它由直流锅炉加再循环泵构成。

六、按煤粉炉的排渣方式分

按煤粉炉排渣方式分有固态排渣炉和液态排渣炉。我国电站燃煤锅炉绝大部分为固态排渣锅炉,只有在特殊煤种的情况下,如低挥发分和低灰熔点煤种时才采用液态排渣炉。

上述每一种分类仅反映了某一方面的特征,为了全面说明某台锅炉的特征,常同时指明其容量、蒸汽压力、工质在蒸发受热面中的流动特性以及燃料特性等,例如某台锅炉的特征为:670t/h超高压、单炉膛四角切圆燃烧、自然循环、一次中间再热、固态排渣煤粉炉。

第四节 典型锅炉介绍

随着我国电力工业的快速发展,火力发电锅炉向大型化和环保型方向发展。目前大型化锅炉主要是配套300和600MW机组的煤粉锅炉,环保型锅炉主要是循环流化床锅炉。

一、配 300MW 机组的亚临界压力煤粉锅炉介绍

国内配 300MW 机组的亚临界压力煤粉锅炉有多种炉型，有直流锅炉、控制循环锅炉和自然循环锅炉等。随着我国对 300MW 机组研究的深入，自然循环的汽包锅炉占据了主要地位。

图 1-2 是东方锅炉厂根据 CE 公司技术设计制造的亚临界压力 300MW 锅炉，采用四角切圆燃烧、自然循环、摆动式燃烧器调温方式。炉膛的宽、深、高分别为 13335mm、12829mm、54300mm，燃用西山贫煤和洗中煤的混煤。在炉膛四角布置 4 只摆动式直流燃烧器，燃烧器有 6 层一次风喷口，4 层油喷口，6 层二次风喷口，气流射出喷口后，在炉膛中央形成 $\phi 700$ 和 $\phi 1000$ 的两个切圆。

炉膛四壁由膜式水冷壁组成，水冷壁管由内螺纹管和光管组成，662 根管子分为 24 组，前后墙和两侧墙各布置 6 组，与 6 根大直径下降管连接，形成 24 个独立的循环回路。

锅炉的顶棚、水平烟道的两侧墙、尾部竖井烟道都由过热器管包覆。

在炉膛上部的前墙和部分两侧墙水冷壁的向火面上紧贴壁式再热器，前墙布置 239 根，两侧墙各布置 122 根，切角处不布置。

炉膛上部空间悬吊着大屏过热器和后屏过热器，大屏过热器采用大节距布置，沿炉宽布置 4 片。为了减小热偏差，每片屏分 4 个小屏，14 管圈并绕。后屏过热器的 13 圈并绕，沿炉宽布置 19 片。

折焰角上部的水平烟道中布置中温再热器，沿炉宽布置 29 片。

高温再热器布置在中温再热器之后的水平烟道中，共 64 片，7 管圈并绕。高温过热器位于水平烟道的末端，共 84 片，6 管圈并绕。

锅炉尾部竖井烟道中布置低温过热器，沿炉宽布置 112 排，由三个水平管组和一个垂直管组组成，5 管圈并绕。

省煤器布置在低温过热器之后，横向排数为 92 排，顺列布置，横向节距为 128mm，纵向节距为 102mm，三管圈并绕。

锅炉配置两台三分仓空气预热器，转子直径为 10320mm。

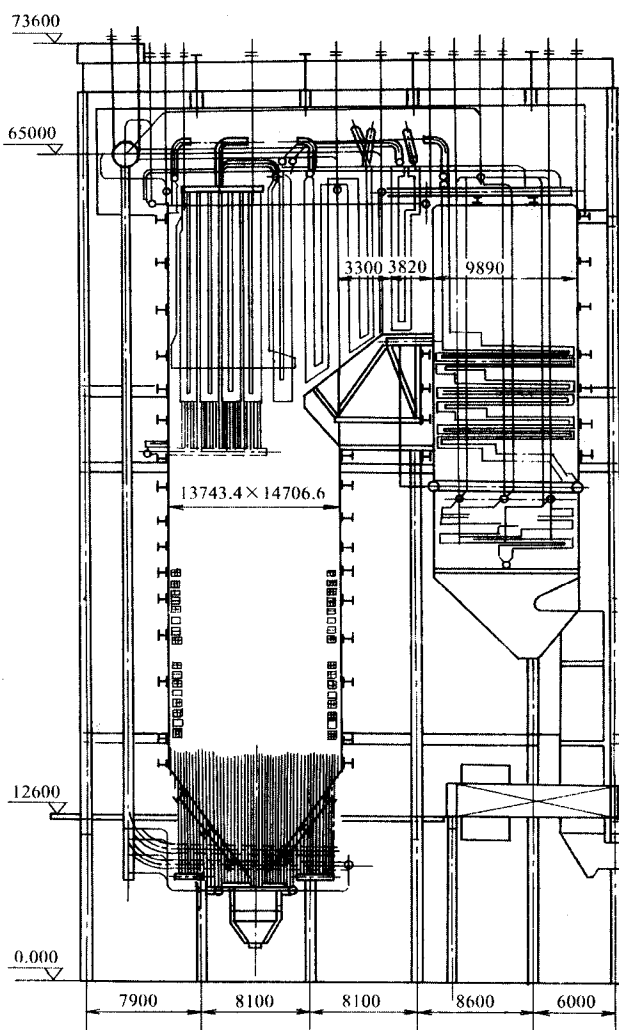


图 1-2 亚临界压力 300MW 汽包锅炉

过热汽温的调节采用三级喷水减温。第一级布置在低温过热器和大屏过热器的连接管道上，第二级布置在大屏出口联箱和后屏进口联箱的左右连接管道上，第三级布置在后屏出口联箱和高温过热器左右连接管道上。一级喷水用于粗调，当高压加热器切除时，喷水量剧增，此时应增大一级减温水量，防止大屏和后屏以及高温过热器超温。三级喷水作为微调 and 调节过热汽温的左右偏差。二级喷水作为备用。

为了保证管屏间距和管子的自由膨胀，在管屏间设置定位管和滑块，定位管由蒸汽冷却。锅炉各部分受热面的材料见表 1-1。

表 1-1 各部分受热面的材料

受 热 面	管子规格 (mm)	管 子 材 料	允许温度 (℃)
前屏过热器	φ51×6	12Cr1MoV/SA-213TP304H	580/704
壁式再热器	φ60×4	12CrMo	540
后屏过热器	φ54×8.5/9	12Cr1MoV	580
	φ60×8/8.5	钢研 102	600~620
中温再热器	φ60×4	12Cr1MoV/15CrMo	560/560
高温再热器	φ60×4	钢研 102/SA-213TP304H	600~620/704
高温过热器	φ51×8/9	12Cr1MoV/钢研 102	580/600~620
低温过热器	φ51×7	12Cr1MoV	580
省煤器	φ51×6	SA-210C	480

二、配 600MW 机组的超临界压力煤粉锅炉介绍

超临界压力锅炉机组采用的技术是直流锅炉，这是由于在超临界压力下，汽水之间的密度差消失，采用自然水循环方式已不可能。我国已有多台进口超临界机组投入运行，引进国外技术国内锅炉厂家生产的超临界机组也已经投运。

图 1-3 是一台超临界压力 600MW 煤粉锅炉示意图。其锅炉型号为 DG1900/25.4-II1 型，是东方锅炉（集团）股份有限公司与日本巴布科克-日立公司及东方日立锅炉有限公司合作设计、联合制造的 600MW 超临界本生型直流锅炉。

锅炉为超临界参数、变压螺旋管圈型直流锅炉、一次再热、单炉膛、尾部双烟道结构，采用挡板调节再热汽温，固态排渣，全钢构架，全悬吊结构，平衡通风，露天布置。燃用晋南、晋东南地区贫煤和烟煤的混合煤种。

炉膛宽为 19419.2mm，深度为 15456.8mm，

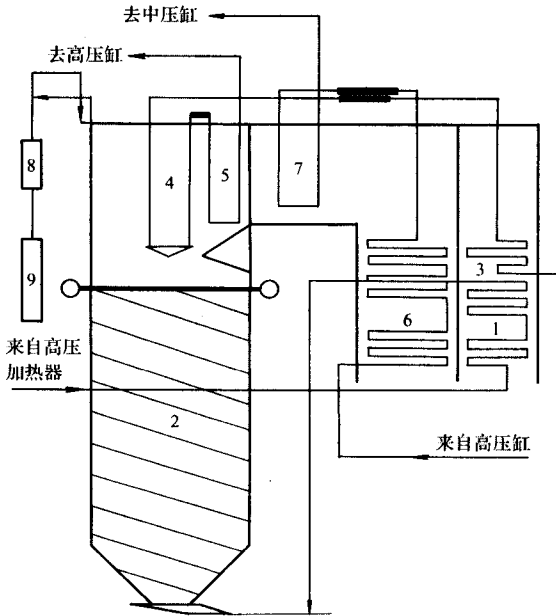


图 1-3 600MW 超临界锅炉整体布置图
1—省煤器；2—炉膛；3—低温过热器；4—屏式过热器；
5—末级过热器；6—低温再热器；7—高温再热器；
8—汽水分离器；9—贮水罐

高度为 67000mm，整个炉膛四周为全焊式膜式水冷壁，炉膛由下部螺旋盘绕上升水冷壁和上部垂直上升水冷壁两个不同的结构组成，两者间由过渡段水冷壁转换连接。

经省煤器加热后的给水，通过单根下水连接管引至两个下水连接管分配集箱，再由 32 根螺旋水冷壁引入管引入两个螺旋水冷壁入口集箱。

炉膛下部水冷壁（包括冷灰斗水冷壁、中部螺旋水冷壁）都采用螺旋盘绕膜式管圈，螺旋水冷壁管全部采用六头、上升角 60° 的内螺纹管，共 456 根。上炉膛水冷壁与常规炉膛水冷壁没有差异，采用结构和制造较为简单的垂直管屏。在上、下水冷壁之间有过渡段水冷壁，其结构主要由螺旋水冷壁前墙、两侧墙出口管全部抽出炉外组成，垂直水冷壁后墙凝渣管由后墙出口管每 4 根管抽取 1 根管子直接上升形成。另 3 根抽出到炉外，抽出炉外的所有管子均进入 24 个螺旋水冷壁出口集箱，由 22 根连接管从螺旋水冷壁出口集箱引入位于锅炉左右两侧的两个混合集箱混合后，再通过 22 根连接管从混合集箱引入到 24 个垂直水冷壁进口集箱，然后由垂直水冷壁进口集箱引出光管，形成垂直水冷壁管屏，垂直光管与螺旋管的管数比为 3:1。这种结构的过渡段水冷壁可以把螺旋水冷壁的载荷平稳地传递到上部水冷壁。

表 1-2

锅 炉 主 要 参 数

名 称	单 位	锅炉最大连续蒸发量 (BMCR)	经济蒸发量 (ECR)	锅炉额定蒸发量 (BRL)
过热蒸汽流量	t/h	1900	1660.8	1807.9
过热器出口蒸汽压力	MPa	25.4	25.1	25.3
过热器出口蒸汽温度	$^\circ\text{C}$	571	571	571
再热蒸汽流量	t/h	1607.6	1414.1	1525.5
再热器进口蒸汽压力	MPa	4.71	4.15	4.47
再热器出口蒸汽压力	MPa	4.52	3.98	4.29
再热器进口蒸汽温度	$^\circ\text{C}$	322	307	316
再热器出口蒸汽温度	$^\circ\text{C}$	569	569	569
省煤器进口给水温度	$^\circ\text{C}$	284	275	280

过热器受热面由四部分组成，第一部分为顶棚过热器及后竖井烟道四壁及后竖井分隔墙；第二部分是布置在尾部竖井后烟道内的水平对流过热器；第三部分是位于炉膛上部的屏式过热器；第四部分是位于折焰角上方的末级过热器。

过热器系统按蒸汽流程分为顶棚过热器、包墙过热器或分隔墙过热器、低温过热器、屏式过热器及末级过热器。按烟气流程依次为屏式过热器、高温过热器、低温过热器。

整个过热器系统布置了一次左右交叉，即屏式过热器出口至末级过热器进口进行一次左右交叉，有效地减少了烟气侧流过锅炉宽度上的不均匀的影响。锅炉设有两级四点喷水减温，每级喷水分两侧喷入，每侧喷水均可单独控制，通过喷水减温可有效减小左右两侧蒸汽温度偏差。

汽轮机高压缸排汽通过连接管从两端进入低温再热器进口集箱。低温再热器蛇形管由水平段和垂直段两部分组成，根据烟温的不同和系统阻力的要求，低温过热器的不同管组采用了不同的节距和管径。水平段分三组水平布置于后竖井前烟道内，由 6 根管子绕制而成，每组之间留有足够的空间便于检修使用，低温再热器横向节距 $S_1=114.3$ ，沿炉宽方向共布置 168 排。低温再热器出口垂直段由两片相邻的水平蛇形管合并而成，低温再热器水平段由包墙过热器吊挂管悬挂支撑并传递到大板梁，低温再热器垂直出口段重量由中间三排管承重并

传递到出口集箱上,其余管子重量均通过 U 型承重块逐根传递到中间三管,通过低温再热器出口集箱悬吊在大板梁上。再热蒸汽经过低温再热器加热后进入低温再热器出口集箱并经过连接管、再热器减温器后从两端引入高温再热器。

高温再热器布置于末级过热器后的水平烟道内,蒸汽从高温再热器进口集箱经蛇形管屏加热后进入高温再热器出口集箱,蛇形管屏共 84 片,每片管屏由 10 根管子绕成 U 型。

过热器的蒸汽温度由水/煤比和两级喷水减温来控制。水/煤比的控制温度取自设置在汽水分离器前的水冷壁出口集箱上的三个温度测点。两级减温器均布置在锅炉的炉顶罩壳内,第一级减温器位于低温过热器出口集箱与屏式过热器进口集箱的连接管上,第二级减温器位于屏式过热器与末级过热器进口集箱的连接管上。每一级各有两只减温器,分左右两侧分别喷入,可分左右分别调节,减少烟气偏差的影响。两级减温器均采用多孔喷管式,喷管上有许多小孔,减温水从小孔喷出并雾化后,与相同方向流动的蒸汽进行混合,达到降低汽温的目的,调温幅度通过调节喷水量加以控制。一级减温器在运行中起保护屏式过热器的作用,同时也可调节低温过热器左、右侧的蒸汽温度偏差;二级减温器用来调节高温过热汽温度及其左、右侧汽温的偏差,使过热蒸汽出口温度维持在额定值。

再热汽温的调节是通过布置在低温再热器和省煤器后的平行烟气挡板来调节的,通过控制烟气挡板的开度大小来控制流经后竖井水平再热器管束及过热器管束的烟气量的多少,从而达到控制再热器蒸汽出口温度。在满负荷时,过热器侧烟气挡板全开,再热器侧烟气挡板部分打开;当负荷逐渐降低,过热器侧挡板逐渐关小,再热器侧挡板开大,直至锅炉运行至最低负荷,再热器侧全部打开。

再热器事故喷水减温器布置在低温再热器至高温再热器间连接管道上,分左右两侧喷入,减温器喷嘴采用多孔式雾化喷嘴。再热器喷水仅用于紧急事故工况、扰动工况或其他非稳定工况,正常情况下通过烟气调节挡板来调节再热器汽温,另外在低负荷时还可以适当增大炉膛进风量,作为再热蒸汽温度调节的辅助手段。

采用中速磨直吹式制粉系统,每炉配 6 台磨煤机,其中 1 台备用,煤粉细度 200 目筛通过量为 80%。

采用前后墙对冲燃烧方式,24 只 HT-NR3 燃烧器分三层布置在炉膛前后墙上,沿炉膛宽度方向热负荷及烟气温度分布更均匀。

燃烧器一次风喷口中心线的层间距离为 4957.1mm,同层燃烧器之间的水平距离为 3657.6mm,上一次风喷口中心线距屏底距离为 27322.3mm,下一次风喷口中心线距冷灰斗拐点距离为 2397.7mm,最外侧燃烧器与侧墙距离为 4223.2mm,能够避免侧墙结渣及发生高温腐蚀。

燃烧器上部布置有燃尽风(OFA)风口,12 只燃尽风风口分别布置在前后墙上。中间 4 只燃尽风风口距最上层一次风中心线距离为 7004.6mm,两侧靠前后墙 2 只燃尽风风口距最上层一次风中心线距离为 4272.3mm。

采用 32 号、VI 型回转式空气预热器,每台锅炉配置两台三分仓空气预热器。转子直径为 13506mm,正常转速为 0.99r/min,空气预热器采用反转方式,即一次风温低,二次风温高,受热面自上而下分为三层。热端和中间段蓄热元件由定位板和波形板交替叠加而成,钢板厚度 0.6mm,材料为 Q215-A.F。冷端蓄热元件由 1.2mm 厚垂直大波纹的定位板和平板构成,采用低合金耐腐蚀钢板。

空气预热器采用先进的径向、轴向和环向密封系统,径向、轴向密封采用双密封,密封周

界短,效果好,并配有性能可靠的、带电子式敏感元件的、具有自动热补偿功能的密封间隙自动跟踪调节装置,在运行状态下热端扇形板自动跟踪转子的变形而调节间隙,以减少漏风。

三、配 135MW 机组的循环流化床锅炉介绍

图 1-4 是配 135MW 机组的循环流化床锅炉,其型号为 HG-440/13.7-L PM4 型,是

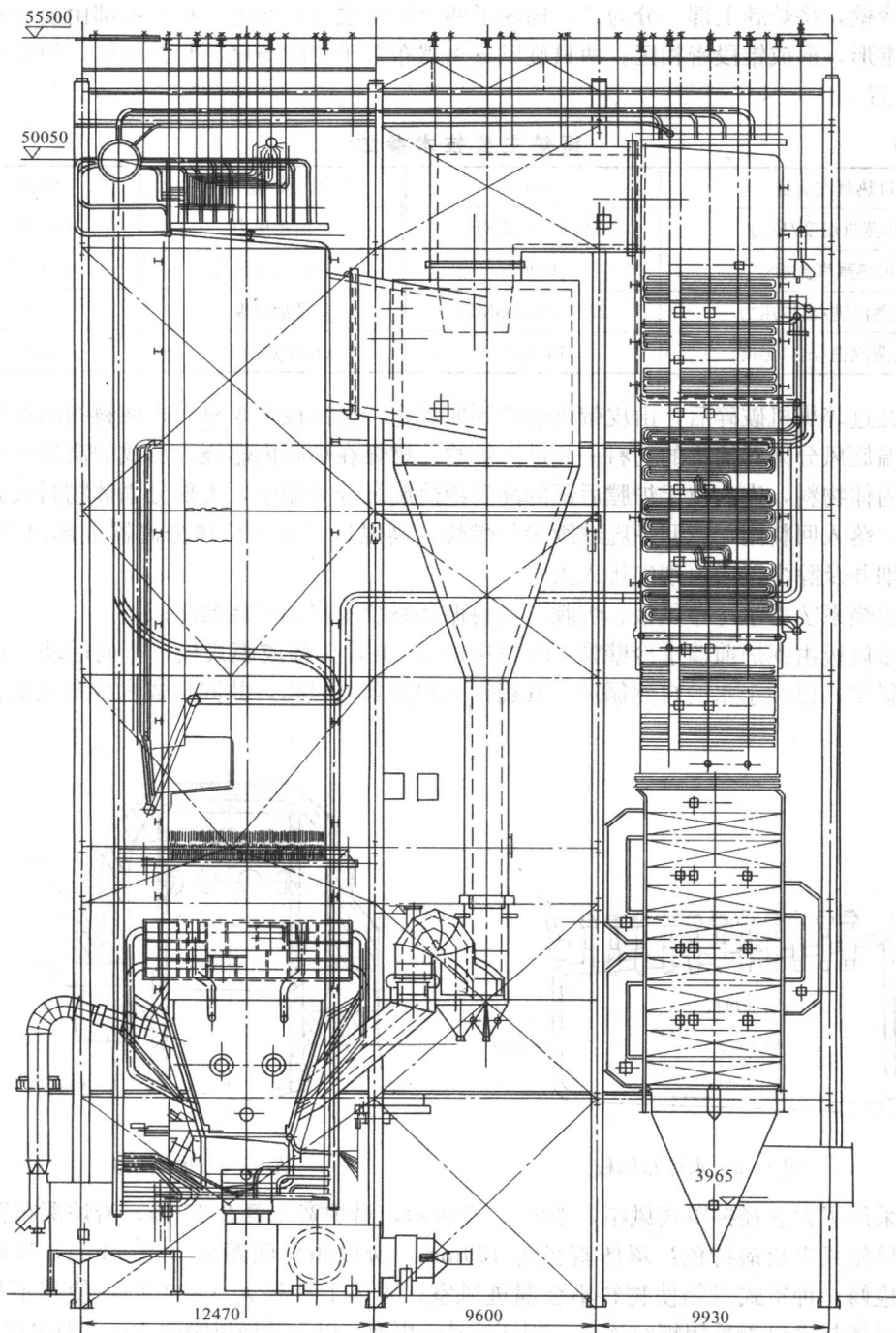


图 1-4 配 135MW 机组的循环流化床锅炉

国内首次采用超高压一次再热技术的循环流化床锅炉，由哈尔滨锅炉厂引进德国 ALSTOM 的 EVT 技术制造。

锅炉整体标高为 55m，汽包中心标高为 50.5m，炉膛净高为 39.5m。锅炉炉膛由膜式水冷壁构成，横断面为 6580mm×13160mm 的矩形，从布风板 12m 高度以上垂直前墙布置双面曝光水冷壁，将炉膛上部一分为二，构成了两个相对独立的通道。炉膛下部由前后水冷壁收缩成倒锥形，形成锥段密相区。两只旋风分离器布置于炉膛与尾部竖井之间，使整台锅炉呈 M 型布置。

表 1-3

锅炉主要技术参数

过热蒸汽流量	440t/h	给水温度	248℃
过热蒸汽温度/压力	540℃/13.7MPa	给水压力	15.7MPa
再热蒸汽流量	360t/h	汽包工作压力	15.16MPa
再热蒸汽进/出口压力	2.621/2.493MPa	排烟温度	130℃
再热蒸汽进/出口温度	316/540℃	锅炉热效率	91.9%

燃煤经过碎煤机破碎后，由皮带机输送到原煤仓，经刮板给煤机送入回料阀的返料斜管中，与高温旋风分离器捕集的物料一起进入炉膛。燃煤在炉膛内燃烧，形成的高温烟气夹带着大量的固体物料，进入位于炉膛后部的高温绝热旋风分离器中，大部分固体物料被旋风分离器分离，落入回料阀，返回炉膛继续参与燃烧，高温烟气则从旋风分离器上部出口排出，进入尾部烟井及除尘器后由烟囱排入大气。

锅炉燃烧系统由水冷布风板、炉膛、物料循环系统及启动燃烧器组成。

水冷布风板由锅炉前墙水冷壁管 146 根中的 48 根管拉稀成膜式板，折向后墙，由前向后向下倾斜 4°，以利于水的自然循环，其扁钢上焊接罩式风帽，共同构成水冷布风板，如图 1-5 所示。

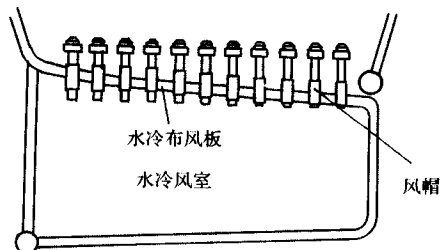


图 1-5 水冷布风板

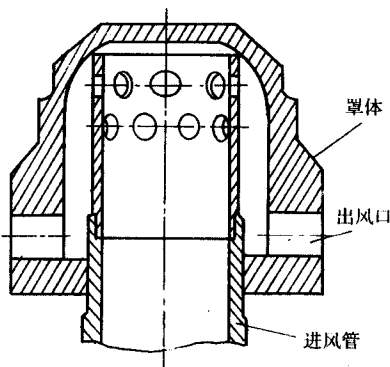


图 1-6 风帽结构

风帽采用了大直径钟罩式风帽，如图 1-6 所示，沿炉宽布置有 47 排，沿炉深布置有 11 排。该型风帽具有哈锅特色：罩体直径为 159mm，所以布置间距大（270mm），风帽数量少，易于检修；钟罩式风帽使物料不会漏进风室；罩体上孔径大（ $\phi 22.5$ ），使其不易被颗粒堵塞；罩体与进风管采用螺纹连接，损坏后易于更换。以上是该风帽的优点，但也存在以下不足：定向排渣功能较弱；风帽暴露于浓相区，易受进入炉膛的物料的磨损；出风口直径较大

($\phi 22.5$), 流速高 (50~70m/s), 使得流化风出口射流动量较大, 射程远, 因此夹带的物料对相邻风帽造成的磨损问题不容忽视; 螺纹连接在经过长时间高温后可能产生变形, 而使拆装困难。

炉膛为立式方形, 采用不等截面形式, 炉膛中、上部截面积较大, 下部截面积渐缩, 呈倒锥形。炉膛深 6580mm、宽 13160mm, 宽深比较大, 保证二次风对物料有良好的穿透能力。在距布风板以上 12m 处, 开始由双面水冷壁将其分为左右对称的两个炉室, 每个炉室上部前墙侧布置有 4 屏屏式过热器和 3 屏再热器, 过热器和再热器交叉布置。

物料循环系统由高温旋风分离器、立管和回料阀组成。

在炉膛与尾部竖井之间布置有两个外径为 8084mm、内径为 7360mm 的绝热高温旋风分离器, 每个分离器下对应一外径为 1900mm、内径为 1300mm、高为 8m 的立管, 立管下接分叉式回料阀, 循环物料共分四路返回炉膛。

高温旋风分离器基于传统的旋风分离理论, 在结构上有其独到之处, 如图 1-7 所示。

(1) 进口下倾 10° , 切向连接于分离器筒体, 使烟气中固体颗粒向下运动, 并减少其短路直接进入中心筒排出的可能性, 有助于气固两相的分离。

(2) 分离器顶部中心筒偏离中心布置, 中心筒位于偏向进口处, 使离开分离器的烟气流中心与中心筒相吻合, 既可以减轻中心筒的磨损, 又可以改善中心筒周围的流场, 减少气流脉动, 提高分离效率。

(3) 中心筒设计独特, 呈倒锥形, 进口外缘加帽檐, 称为导涡器, 该设计可有效控制上升气流速度, 减少旋涡气流对颗粒的裹带, 因此可提高分离效率。

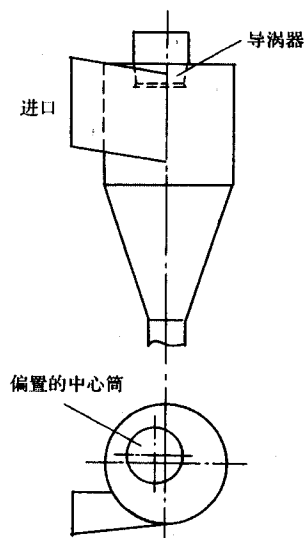


图 1-7 高温旋风分离器结构图

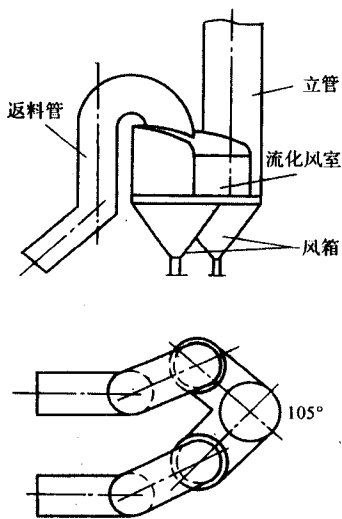


图 1-8 U 型回料阀结构示意图

回料阀为 U 型阀, 并采用了类似 Pyroflow 公司的分叉管技术, 可以看作是两个 U 型阀背靠背布置, 只不过共用一个立管, 回料阀流化风室也因此变为 3 个, 两个阀体水平夹角为 105° 布置, 如图 1-8 所示。采用这种分叉管技术可以将循环物料返回点和燃料供入点增加一倍, 使循环物料、燃料均匀进入炉膛, 同时还可减轻循环灰流对布风板风帽的强烈冲击磨损。回料阀中的风帽结构与炉膛布风板风帽相同, 但尺寸缩小。

锅炉采用“床上+床下”点火的联合启动方式, 即点火系统由床下点火与床上点火两部分组成。床下启动燃烧器两只, 床上距布风板约 3m 处共布置 4 只油枪 (两侧墙各 2 只)。这种点火方式可以缩短锅炉启动时间。床下启动燃烧器为热烟发生器, 将通入布风板下水冷风室的一次风加热到 900°C 左右, 再由热风去加热床料, 采用床下启动燃烧器加热均匀, 床温易于控制。床上启动燃烧器设有油枪、点火器和火焰监测器, 油枪和点火器均可伸缩, 因其火焰直接与物料接触,