

全能值班员技能提升指导丛书

锅炉分册

大唐国际发电股份有限公司 编

注重理论结合实际

强调实际操作技能提升

培养合格的全能值班员



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

全能值班员技能提升指导丛书

锅炉分册

大唐国际发电股份有限公司 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

全书分十三章,主要结合大唐国际发电股份有限公司最为常见的亚临界、超临界及循环流化床机组的特点,介绍电站锅炉常用设备与系统的结构、设计理念、操作调整、启停、注意事项等内容。本书的理论知识相对简单,主要是帮助运行人员理解这些现场设备实际操作理念的由来。本书还配备一定数量的案例,以增加运行值班人员的直接感性认识。

本书主要针对有一定实际工作经历的运行值班员学习使用;也可供即将走上工作岗位的学生参考,以便把理论知识更快地与工作实践结合起来;还可以供高等院校热能动力工程等专业的大学生参考,帮助他们更深入地了解现场的实际情况。

图书在版编目(CIP)数据

全能值班员技能提升指导丛书. 锅炉分册/大唐国际发电股份有限公司编. —北京:中国电力出版社,2008
ISBN 978-7-5083-6555-8

I. 全… II. 大… III. ①发电厂-电工-技术培训-教材②火电厂-锅炉-技术培训-教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002385 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 400 千字

印数 0001—8000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《全能值班员技能提升指导丛书》

编 委 会

主 任 佟义英

副主任 方占岭

委 员 (按姓氏笔画排列)

王俊清 田小鹏 白 岭 伍小林 李玉昆

张 洁 项建伟 赵世杰 赵振宁 高向阳

《锅炉分册》编审人员 (按姓氏笔画排列)

王卫东 李玉昆 张 聪 赵振宁

祝 宪 骆 意 董绍存

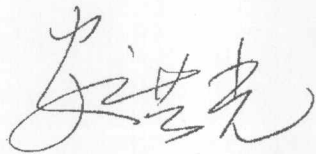
序

伴随着我国国民经济的快速增长,电力工业得到了迅猛发展。为了更好地节约能源,保护生态环境,建设生态文明,电力行业努力降低供电煤耗和减少污染物的排放,不断发展清洁高效发电技术,高参数、高效率、大容量火电机组不断增加。新技术、新设备、新材料大量采用,机组系统大,测点多,自动调节系统多,控制逻辑复杂,保证机组的安全、可靠、经济运行是发电企业面临的重要任务。

单元机组集中控制是当今大型发电机组的主要控制方式,集控全能值班制是各发电企业普遍采用的运行管理体制,这对发电企业运行全能值班员的素质提出了更高的要求。加强集控运行人员的培训工作,尤其是有针对性的现场实际操作技能的培训已成为各发电企业运行管理工作的当务之急。

科学技术是第一生产力,人力资源是第一资源,加强员工的技术培训是实现企业和员工共同愿景的重要途径和方法。作为国有控股大型发电企业,大唐国际发电股份有限公司一直致力于公司的协调发展。在公司业务不断延伸、规模不断扩大的同时,本着提供优质电能、保障电网安全运行的出发点,采取了多种方式狠抓运行管理工作,尤其是运行培训工作,并不断根据实际发展状况,摸索新的更行之有效的培训方法。

本套丛书是大唐国际发电股份有限公司根据集控全能值班制的发展状况,有针对性地组织编写的技能培训丛书,旨在提高全能值班员的理论、实际操作水平,从而提高企业安全经济运行水平。我们希望通过本套丛书的编写、出版,能够与兄弟企业从事发电运行管理工作的人员相互借鉴、交流经验,同时更好地促进行业技术和管理水平的提高。



前言

近几年来,随着电力工业的快速发展,大容量、高参数发电机组迅速增加,600MW超临界机组及300MW循环流化床机组陆续投产。由于新机组投入商业运行的进程不断加快,各发电企业无法抽出专门的时间对运行人员进行有计划、有系统的技术培训,而运行值班人员又需要不断更新、补充上岗,因此对当前集控运行值班人员的在岗培训显得尤为迫切。为适应这一形势,大唐国际发电股份有限公司组织公司的生产技术人员和华北电力科学研究院有限责任公司的有关专家,着手编写了这套《全能值班员技能提升指导丛书》。

本书为丛书的《锅炉分册》,主要面向发电厂运行值班人员,内容包括300~600MW机组常用锅炉设备与系统的结构、设计理念、操作调整注意事项及其出处,有一定的理论深度,而且增加了现场设备实际操作的指导原则、要点、注意事项及相关案例内容。这使得本书对运行值班人员的学习更具有实际意义,这也是本书有别于其他图书的一大特色。本书对即将走上工作岗位的学生,也有很好的参考意义,可以把他们学到的理论知识更快地与实践结合起来。应当注意的是,本套丛书只对设备的操作进行通用的描述,所以不能代替运行规程。

本书主要由张家口、宁德、陡河及红河等发电厂与华北电力科学研究院有限责任公司根据大唐国际发电股份有限公司各发电企业设备的具体情况,结合原理、结构、功能及实际操作编写的,具有较强的实用性。全书共分十三章,其中,第一章、第三章、第六章第一节与第二节、第九章及第十二章主要由华北电力科学研究院有限责任公司赵振宁编写;第二章、第四章、第五章、第十一章及第十三章主要由张家口发电厂王卫东、宁德发电厂李玉昆编写;第十章由原红河发电厂总工程师陈刚及张聪编写;第九章由华北电力科学研究院有限责任公司骆意编写。全书由李玉昆负责内容汇总;由李玉昆、张家口发电厂董绍存、赵振宁进行初审;最后由赵振宁进行统稿,对全书内容进行了修改、补充和完善。此外,李庆生、邱盈忠、李帅、肖鹏、曹广明、陈通杰、张玉忠、徐敬、谢长松、唐晓飞、赵海峰、张鑫等参与了编写并提供资料。

在本书编写过程中,得到了大唐国际发电股份有限公司、各发电厂和华北电力科学研究院有限责任公司各级领导的大力支持,在此表示感谢。由于编者水平有限,难免存在疏误之处,恳请读者提出宝贵意见,以便今后进一步修订。

本书编委会

2007年10月

目 录

序 前言

第一章 锅炉的工作原理和基本类型	1
第一节 汽包锅炉与直流锅炉	1
第二节 超临界直流锅炉的特点	6
第三节 各种锅炉的优缺点	10
第四节 循环流化床锅炉的工作原理及特点	12
第五节 锅炉其他分类方法及其特点	14
第二章 锅炉构造	16
第一节 给水设备及系统的构成	16
第二节 自然循环锅炉的蒸发设备及循环系统的构成	17
第三节 直流锅炉蒸发受热面	21
第四节 机组过热器、再热器及调温方式	30
第五节 省煤器和空气预热器	43
第六节 电厂阀门种类及调节特性	51
第七节 制粉系统	62
第八节 锅炉风机及烟风系统	73
第九节 燃烧器类型及布置	84
第十节 燃油及点火系统	95
第十一节 吹灰和除灰除渣系统	96
第十二节 静电除尘器	102
第十三节 空气压缩机及压缩空气系统	104
第十四节 火检及冷却风机	108
第三章 燃料	110
第一节 燃煤的成分及特性	110
第二节 点火及助燃用油	116
第三节 燃煤的着火及燃烧特性	117
第四节 燃煤的结渣和沾污特性	119

第四章 机组启动	123
第一节 亚临界汽包锅炉的启动	123
第二节 超临界直流锅炉的启动	127
第五章 机组停机	131
第一节 概述	131
第二节 机组停运	132
第三节 锅炉停运后的保养	135
第六章 锅炉运行	139
第一节 煤粉气流的着火与燃烧	139
第二节 炉内结渣与防治	144
第三节 空气预热器的烟气侧低温腐蚀	147
第四节 尾部受热面的积灰和堵塞	149
第五节 省煤器的飞灰磨损	151
第六节 风量的控制	152
第七节 受热面损坏处理	155
第八节 优化吹灰与防吹损	157
第九节 风机启停及运行控制要点	158
第十节 制粉系统启停及运行控制要点	160
第七章 锅炉常见故障及处理原则	167
第一节 四管泄漏	167
第二节 制粉系统的事故及故障处理	171
第三节 锅炉灭火与烟道再燃烧	176
第四节 风机运行中常见故障	178
第八章 逻辑控制的原理、组态	183
第一节 逻辑的介绍	183
第二节 锅炉保护逻辑	183
第三节 机、炉、电大连锁逻辑	185
第四节 机炉协调	185
第五节 主要辅机的连锁与保护逻辑	191
第六节 RB的功能	194
第九章 经济运行	195
第一节 煤质对火电厂安全生产和经济效益的影响	195
第二节 锅炉经济运行的总体控制思路	198
第三节 电厂锅炉变氧量运行的经济性及经济氧量的优化确定	203

第十章 循环流化床锅炉运行..... 205

第一节 循环流化床锅炉基本构造..... 205

第二节 循环流化床锅炉主要系统..... 208

第三节 循环流化床锅炉的运行控制..... 210

第四节 循环流化床锅炉启动前的准备工作..... 213

第五节 锅炉启动..... 214

第六节 锅炉停运..... 217

第七节 常见事故处理..... 218

第十一章 锅炉试验..... 222

第一节 锅炉水压试验..... 222

第二节 安全阀现场校验..... 225

第三节 连锁保护试验..... 228

第四节 油枪点燃试验..... 229

第五节 锅炉热平衡试验..... 230

第十二章 NO_x 控制 232

第一节 概述..... 232

第二节 NO_x 的生成机理 232

第三节 低 NO_x 燃烧技术 235

第十三章 脱硫运行..... 238

第一节 脱硫装置原理..... 238

第二节 脱硫系统及设备..... 239

第三节 脱硫系统在运行中应注意的问题..... 247

参考文献..... 253

锅炉的工作原理和基本类型

锅炉的分类方法很多,根据燃烧方式可以分为层燃炉、煤粉炉及(循环)流化床锅炉。煤粉炉为电厂锅炉的主要应用类型,根据燃烧组织方式分为切圆燃烧锅炉与旋流燃烧器对冲燃烧锅炉。根据锅炉蒸发系统中汽水混合物流动方式的不同,把锅炉分为自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉三种。此外还有很多的其他分类方法,可以参阅其他文献。

本章主要以自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉为主线进行介绍,并简单介绍其他方式分类,如切圆燃烧与旋流燃烧器(对冲)燃烧方式的不同,煤粉燃烧炉与循环流化床锅炉之间的区别及特点。

第一节 汽包锅炉与直流锅炉

我国目前在役机组中,数量最多的机组为亚临界机组(工质压力在 $16\sim 18\text{MPa}$)。在这些机组中,大多数的锅炉为汽包锅炉。汽包锅炉又分为自然循环汽包锅炉与强制循环汽包锅炉两种类型,主要差别在于:自然循环锅炉的蒸发受热面内,工质的流动是依靠下降管中与上升管中汽水混合物之间的密度差所形成的压力差来推动的,而强制循环锅炉蒸发受热面内工质的流动是依靠锅炉循环泵压头和汽水密度差来推动的。

直流锅炉没有汽包,工质一次性通过各受热面,没有循环,但直流工况需要一定负荷后才能建立。低负荷时,其蒸发受热面工质流动靠炉水循环泵驱动,用一个立式、薄壁的汽水分离器充当临时汽包,所以直流锅炉低负荷时,视同强制循环锅炉。随着主蒸汽压力的增加,水与蒸汽的密度差越来越小,到了超临界机组后,只能采用直流锅炉。

一、自然循环汽包锅炉

自然循环汽包炉工作原理见图1-1,各个回路由汽包,下降管、下联箱与水冷壁构成,水冷壁为辐射式受热面,上部通过上联箱后由引汽管接入汽包。

机组冷态时,下降管和水冷壁管中都是温度相同的水,水是不流动的。锅炉点火后,水冷壁管受热逐渐产生蒸汽,而下降管不受热,管中仍是水。这样,由于蒸汽的密度小于水的密度,因而水冷壁管中汽水混合物的平均密度小于下降管中的水密度,这个密度差促使水冷壁管中的汽水混合物向上流动,下降管中的水向下流动,形成汽水循环流动。因此,水冷壁管也称上升管,这种循环没有泵作为动力,所以称为自然循环。

在自然循环锅炉中,上升管出口工质并不能完全变成蒸汽,而是

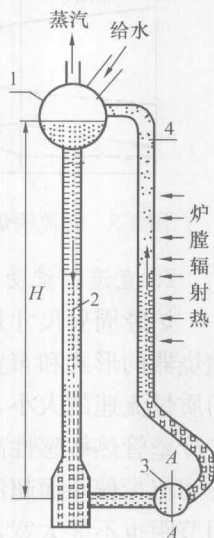


图1-1 自然循环原理

1—汽包; 2—下降管;

3—下联箱; 4—上升管

汽水混合物。表征上升管中蒸汽含量用干度 x 来表示，其含义为蒸汽质量在汽水混合物质量中所占的份额。如 $x=0.2$ 或 $x=20\%$ ，说明汽水混合物质量中有 20% 是蒸汽。一般来说，压力越低，干度越小，亚临界参数锅炉的干度不超过 25% ，高压锅炉的干度在 10% 以下。

由于上升管出口工质并不能完全变成蒸汽，上升管出口获得 1kg 蒸汽需要在上升管入口送进更多质量的水，这将非常有利于上升管的冷却，使其在更为安全的状态下工作。每蒸发 1kg 蒸汽与蒸发所需要的循环水量的比值称为循环倍率，数值上正好是干度 x 的倒数，循环倍率越大，自然循环锅炉水冷壁的安全性越高。

二、直流锅炉

1. 直流锅炉工作原理

直流锅炉依靠给水泵的压头将锅炉给水一次通过预热、蒸发、过热各受热面而变成过热蒸汽，直流锅炉的工作原理如图 1-2 所示。

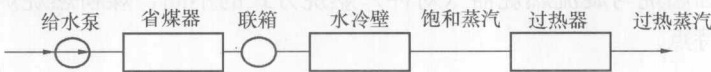


图 1-2 直流锅炉工作原理示意图

与自然循环汽包炉不同的是，在直流锅炉蒸发受热面中，由于工质的流动不是依靠汽水密度差来推动，而是通过给水泵来实现的，因此工质一次通过各受热面，蒸发量 D 等于给水量 G ，即直流锅炉循环倍率为 1。此外，直流锅炉水的加热受热面和蒸发受热面间，及蒸发受热面和过热受热面间无固定分界点，在工况变化时，各受热面的长度会发生变化。沿直流锅炉管子工质的状态参数和变化情况示意图如图 1-3 所示。

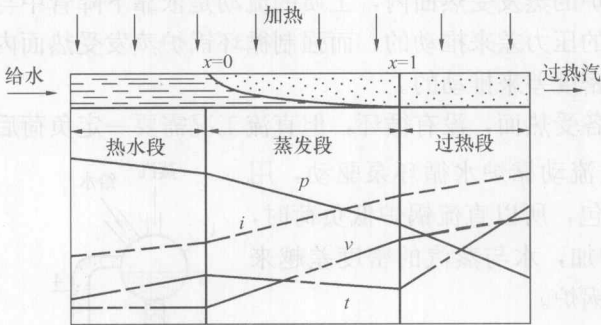


图 1-3 直流锅炉管子工质的状态和参数的变化

由于要克服流动阻力，工质的压力沿受热面长度不断降低，工质的焓值沿受热面长度不断增加，工质的温度在预热段和过热段不断上升；而在蒸发段，由于压力不断降低，工质的温度也在降低；工质的比体积则沿受热面不断上升。

由于要克服流动阻力，工质的压力沿受热面长度不断降低，工质的焓值沿受热面长度不断增加，工质的温度在预热段和过热段不断上升；而在蒸发段，由于压力不断降低，工质的温度也在降低；工质的比体积则沿受热面不断上升。

2. 直流锅炉受热面布置难题

炉膛周界尺寸是由燃烧的条件决定的，它取决于炉膛的净热输入、燃料的种类和特性、燃烧器的形式和布置。对垂直管水冷壁而言，炉膛周界长度、管子直径、管间节距决定了它的质量流速的大小，而管子直径和节距的选择都有一定的限制。例如管子的直径过细会造成水冷壁管热敏感性高，使管子内壁上发生结垢和热负荷的变化，继而使某些管子产生过大的管间流量偏差而超温。因此管子内径的选择不宜过小。同时为了防止管间鳍片过热烧损，管间节距也不能太宽，一般以鳍端温度与管子正面顶点温度相等作为鳍片宽度选择的原则。综上所述，在一定的炉膛周界情况下，如采用垂直布置的水冷壁管，其管子根数基本固定，管间距不能太大，管子直径也不能过细。为了保证水冷壁管子的安全，必须保证一定的工质流量，所以垂直管圈的质量流速大小是受到严格限制的。

直流锅炉面临的最大挑战是水冷壁的布置问题。对于汽包锅炉，由于水冷壁管中流动的汽水量远大于锅炉给水量与主蒸汽量（4~12 倍），所以，这些锅炉的水冷壁一般并列、垂直地布置于炉膛周界；可以采用较粗的管径，这样能使管内有较大的质量流速，以保证水冷壁的冷却能力。而对于直流锅炉，由于水冷壁中间的流量与主蒸汽流量相等，如果采用与汽包锅炉相同的水冷壁布置方案，相当于上升管路中工质流量只有汽包炉的 $1/12 \sim 1/4$ （该数值即为循环倍率的倒数，随工作压力的不同而不同，压力高的锅炉循环倍率低），水冷壁冷却能力严重不足。因此，为了保证水冷壁的安全，直流锅炉采取很多种措施来提高水冷壁内的工质质量流速 ρw 。

要想提高流速，只有两个方法，即提高流量或减少水冷壁的通流面积。

提高流量即提高了机组容量，但锅炉容量增大的同时也提高了炉膛周界尺寸，使通流面积增加。炉膛周界指锅炉炉膛一圈的长度，主要由锅炉容量决定，容量越大，锅炉越大，周界越长；反之周界较小。但炉膛周界尺寸的增加与锅炉容量的增加是不成正比例的，因此容量较小的直流锅炉水冷壁往往存在单位容量炉膛周界尺寸过大，水冷壁管子内难以保证足够的质量流速。同时，锅炉周界还受燃料影响很大，锅炉设计燃料越好（发热量高、挥发分高、易燃），燃烧越集中，燃烧区热负荷越大，这对锅炉的安全是不利的。为了降低燃烧区热负荷，保证锅炉安全，锅炉设计往往采用加大炉膛周界的方法来减少炉膛燃烧器区热负荷，锅炉呈“矮胖”型，反之，锅炉周界较小，呈“瘦高”型。即使 600MW 容量的锅炉，在负荷低于 60% 左右时质量流速也显得不足（这里指的是采用较粗的管子且无多次上升垂直管圈，即采用 UP 型一次上升水冷壁结构）。

单纯从提高容量的角度来保证直流锅炉水冷壁的安全性是不现实的，苏尔寿公司很久以前就认为，直流锅炉水冷壁设计成一次上升垂直管圈的极限容量最小应该在 700MW 以上，所以主要还是从减少水冷壁的通流面积来入手解决。

3. 直流锅炉的三种基本形式

减少水冷壁的通流面积也有两个方向，其一为减少上升管的管径，其二为不在整个炉膛周界上完全并列布置上升管受热面。第一种思路在我国早期上海锅炉厂 300MW 直流炉上采用，由于管子变细后带来刚性下降，引起锅炉安全性问题，证明是一种不安全的设计。因此，大多数锅炉在减少上升管直径的同时，又结合第二种思路进行设计。早期直流锅炉有三种不同蒸发受热面和汽水系统的布置方式，即多次串联垂直上升管屏式（本生式）、回带管圈式（苏尔寿式）及水平围绕上升管圈式（拉姆辛式），如图 1-4 所示。

（1）垂直上升管屏式直流锅炉（通用压力 UP 型锅炉）。垂直上升管屏式直流锅炉，其水冷壁很像自然循环锅炉，但其管屏为多次串联上升，每组管屏有上、下联箱。串联管屏之间用 2~3 根不受热的下降管连接起来，若干个管屏串联成一组，整个锅炉由一组或几组管屏构成。这样，锅炉的周界并非一次全部并列所有由省煤器来的新水管屏，可以大大减少并列上升管的通流面积，保证水冷壁内的工质质量流速。

这种锅炉压力既适用于亚临界也适用于超临界，特点是各管壁间温差较小，适合采用膜式水冷壁，管系简单、流程短、汽水阻力小，可采用全悬吊结构、安装方便。但由于垂直管屏具有中间联箱，不适合作滑压运行。

因为炉膛周界尺寸与锅炉容量不是成正比增加的，所以当机组容量大于 600~700MW 后，这种类型的锅炉水冷壁可以设计成一次上升垂直管圈，与汽包锅炉的水冷壁相同，可以

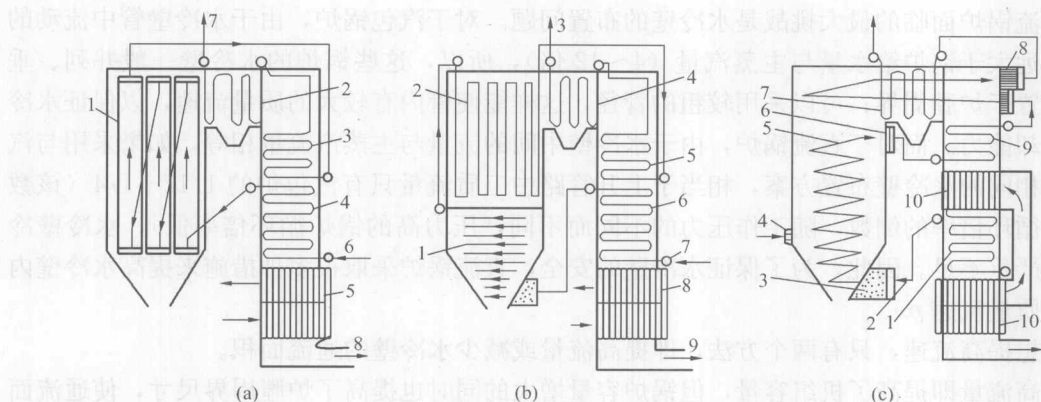


图 1-4 三种型式直流锅炉的结构图

(a) 垂直上升管屏式；(b) 回带管屏式；(c) 水平围绕管圈式

(a) 1—垂直管屏；2—过热器；3—外置式过渡区；4—省煤器；5—空气预热器；
6—给水入口；7—过热汽出口；8—烟气出口

(b) 1—水平回带管屏；2—垂直回带管屏；3—过热汽出口；4—过热器；5—外置过渡区；
6—省煤器；7—给水入口；8—空气预热器；9—烟气出口

(c) 1—省煤器；2—炉膛进水管；3—水分配集箱；4—燃烧器；5—水平围绕管圈；6—汽水混合物
出口集箱；7—对流过热器；8—过热器；9—外置式过渡区；10—空气预热器

变压运行。

(2) 水平围绕上升管圈式直流锅炉。该类锅炉是前联邦德国等国为适应变压运行的需要发展起来的一种类型，水冷壁采用螺旋围绕管圈，可以自由选择并列管圈的通流面积，保证质量流速。其特点是管圈间吸热较均匀，蒸汽生成途中可不设混合联箱，滑压运行时不存在汽水混合物分配不均的问题。但是这种锅炉管程长、阻力大，易产生流量不均的现象，且安装困难，现场工作量大，因此只适用于容量 300MW 以下的小锅炉，300MW 以上机组很少采用。

(3) 下部螺旋管圈上部垂直管屏式（回带管圈式）直流锅炉。此种锅炉是结合上面两种锅炉的优点发展起来的炉型。包括冷灰斗在内的炉膛下部采用螺旋盘绕水冷壁，上部采用垂直水冷壁，使其在各种工况，特别是启动和低负荷工况下能够保证各水冷壁管内具有足够的质量流速，从而可使管间吸热均匀，减小炉膛出口工质的温度偏差，适于变压运行及锅炉调峰。但早期这种锅炉下部水冷壁采用水平围绕上升，容易在汽水流速较低时产生上部为汽、下部为水的汽水分层现象，对锅炉的安全不利。

(4) 现代化直流锅炉发展情况。随着科技的发展，锅炉主力机组容量及参数有了很大的提高，目前，容量在 600MW 以上，蒸汽压力在 25~31MPa，温度控制在 540~600℃ 的超临界、超超临界机组已在我国大量投产。这种机组能够较大幅度提高循环热效率，降低发电煤耗，已经成为我国日后发展的主要方向。由于超临界机组只能采用直流锅炉，所以超临界机组的发展过程，实际上就是现代直流锅炉的发展过程。

由于水平围绕上升管圈式直流锅炉在 1000t/h 以上的直流锅炉中基本放弃，所以现代 600MW 以上的直流锅炉发展基于图 1-4 所示的另外两种，即垂直上升管屏式和下部螺旋管圈上部垂直管屏式两种。垂直上升管屏式直流锅炉目前已经可以在 600MW 机组上安全地采

用一次垂直上升管屏式（UP 型）技术，而下部螺旋管圈上部垂直管屏式直流锅炉也与图1-4所示有所不同。其下部螺旋管圈不再采用水平管圈，而是采用倾斜向上的螺旋管屏，这样可以避免水平管圈低工质流速时的汽水分层问题，增加并列管的数量，加大管屏宽度，同时减少螺旋圈数，有利于减少整体阻力。现代大型直流锅炉采用的下部螺旋管圈上部垂直管屏布置方式可参见后文介绍宁德电厂的锅炉布置方式。

采用这种技术除了金属材料及燃烧技术的发展以外，关键在于在高热负荷区大量采用内螺纹管。流体（如水）在内壁光滑的管子中流动，在距管子内壁很小的范围之内，会产生一层速度很低，基本不流动的流体膜，称为边界层，这层膜隔绝了热量从管壁到管内流体之间的传热（通过边界层时只能采用传导的方式，热阻很高）。因此，为了达到良好的传热效果，光管必须采用更大的质量流速。内螺纹管在其管子的内侧设有螺旋向前的螺纹，使得流体向前流动时要经过凹凸不平的流道，产生一种“摔打”作用，就不容易产生稳定的边界层。因此，其传热效果与光管相比有很大的提高，也不容易在其中产生较大的汽泡，可以避免多种膜态沸腾。

直流锅炉光管水冷壁中质量流速（满负荷）要求一般为 $2000 \sim 2500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，采用了内螺纹管的水冷壁，质量流速则可以降到 $1840 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。而国内大量亚临界锅炉（有循环倍率）的运行经验表明，质量流速在 $1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右，就足以避免亚临界压力下的膜态沸腾。

内螺纹管的应用使得直流锅炉对于炉膛周界的要求大为降低。石洞口二厂最早引进的 600MW 超临界参数锅炉为 Π 型布置，炉膛下部为螺旋管圈水冷壁，炉膛上部布置垂直管屏水冷壁，燃用烟煤，采用四角切圆燃烧方式；大唐国际发电股份有限公司（以下简称大唐国际）沿海几个电厂采用的国产哈尔滨锅炉厂生产的 600MW 超临界参数锅炉为 Π 型布置，炉膛下部为螺旋管圈水冷壁，炉膛上部布置垂直管屏水冷壁，燃用烟煤，采用前后墙对冲燃烧方式；而上海锅炉厂引进技术生产的江苏利港电厂的超临界 600MW 锅炉，采用一次上升垂直管圈设计，也可以安全运行。

（5）螺旋上升角的选择。螺旋管圈的设计既要减少组成炉膛水冷壁管子的数量，保持较高的质量流速，又要不断加大管子之间的节距，使管子和肋片的金属壁温在任何工况下都安全。通过改变管子的上倾角还可以调节管子平行管的数量，保证容量较小的锅炉并列管束数量较小，从而获得足够的工质质量流速，使管壁得到足够的冷却，消除传热恶化对水冷壁管子安全的威胁。这样水冷壁的设计就可避免采用热敏感性过大、直径过细的管子。

螺旋管圈盘绕的圈数与螺旋角和炉膛高度有关。圈数太小会部分丧失螺旋管圈在减少吸热偏差方面的效益；圈数太多会增加水冷壁的阻力降，从而增加水泵功耗，而且在减少吸热偏差方面增益不大。合理的盘绕圈数的推荐值为 1.5~2.5 圈左右。螺旋管圈数量与炉膛周界的关系几何原理如图 1-5 所示。

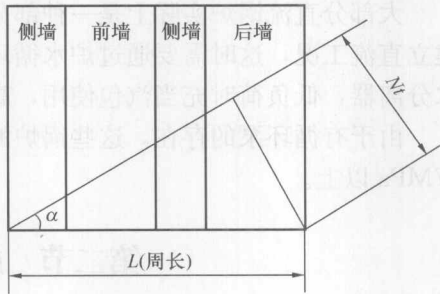


图 1-5 螺旋管圈的几何原理

由图 1-5 可知，管子根数

$$N = \frac{L \sin \alpha}{t}$$

式中 N ——并列管子根数;
 L ——炉膛周界;
 α ——螺旋管上升角;
 t ——水冷壁管子节距。

在管间节距不变的情况下,如要保持螺旋管的根数不变,那么炉膛周界 L 减少,螺旋角 α 就要增加。如要保持炉膛周界不变,那么螺旋角减小,管子根数 N 亦减小。在管径一定的条件下,管子根数 N 决定了水冷壁的质量流速。当螺旋角 α 达到最大值 90° 时,螺旋管就变成垂直管了。此时, $N=L/t$, 并列管子根数最大。

冷灰斗区的螺旋管圈水冷壁与冷灰斗以上区域及螺旋管圈与垂直管屏都存在过渡,过渡形式有两类:一类是垂直管圈冷灰斗加分叉管过渡的形式,下面的水冷壁经过一些分叉管,分成若干根管子,这种转换方式两边的管子必须成比例;另一类是螺旋冷灰斗加中间混合集箱过渡的形式。一般采用中间混合集箱,这种方法可以在低负荷时获得均匀的汽水两相分配效果,减少节流圈的使用,并能保证很小的工质出口温差,过渡两边转换根数之比也没有限制,因此,是一种更好的过渡方式。

三、强制循环锅炉

强制循环锅炉又称控制循环锅炉,该锅炉有两种类型。一种是强制循环汽包锅炉,主要特征与汽包锅炉相似,其循环回路同样由汽包、下降管、下出联箱及上升管组成,不同之处是在下降管与下联箱的中间加了一台炉水循环泵,炉水循环泵为水循环的主要驱动力。这种锅炉一般用在主蒸汽压力高于 16MPa 的亚临界锅炉(如哈尔滨锅炉厂生产的天津大唐盘山电厂 3、4 号锅炉与内蒙古大唐托克托电厂 1、2 号锅炉等)。这种锅炉一般采用“低压头循环泵加内螺纹管”构成的改良型控制循环系统,在燃烧区高热负荷区域采用内螺纹管,使水冷壁内水循环质量流速更低,循环倍率最低为 2 倍。

另外一种强制循环锅炉,这种锅炉更接近直流锅炉,如神头二期锅炉(型号为 1650-17.46/3.85-540/540)。这种锅炉的蒸发段同样设有强制循环泵,但用立式布置的小型汽水分离器来代替汽包,同时采用更小的循环倍率($K=1.25\sim 1.4$)。汽水分离器一般为立式,高达十几米到几十米,但是直径、壁厚都远小于汽包,所以其启动、变负荷的速度超过汽包锅炉。但是由于循环倍率的减少,蒸发段采用垂直管径要小于汽包控制循环汽包锅炉的管径,同时分离器水位波动较大,控制比汽包水位循环困难。

大部分直流锅炉实际上是一种部分负荷下的强制循环锅炉。因为在低负荷时,锅炉无法建立直流工况,这时需要通过炉水循环泵建立起循环倍率很低的水循环。直流锅炉也设有汽水分离器,低负荷时充当汽包使用,高负荷时充当流通件。

由于有循环泵的存在,这些锅炉的工作压力可以比自然循环锅炉略高一些,大部分都在 17MPa 以上。

第二节 超临界直流锅炉的特点

由于超临界、超超临界机组具有非常高的效率,既节能又环保,我国今后投产的火电机组大部分将是超临界机组。2006 年,大唐国际首次在南方沿海三厂投产八台超临界机组,并继续在宁德电厂扩建两台 660MW 超超临界机组,在潮州电厂扩建四台 1000MW 超超临

界机组，而且还有很多台超临界机组陆续上马。本书以宁德电厂 600MW 超临界机组为例，介绍超临界直流锅炉的一些特点。

一、锅炉类型

宁德电厂 600MW 超临界燃煤发电机组锅炉由哈尔滨锅炉厂与三井巴布科克公司合作设计制造，型号为 HG-1900/25.4-YM4。该锅炉为一次再热、单炉膛、前后墙对冲燃烧方式、尾部双烟道结构，采用烟气挡板调节再热汽温，是固态排渣、平衡通风、全钢构架、露天布置、全悬吊结构的 II 型炉，其结构如图 1-6 所示。

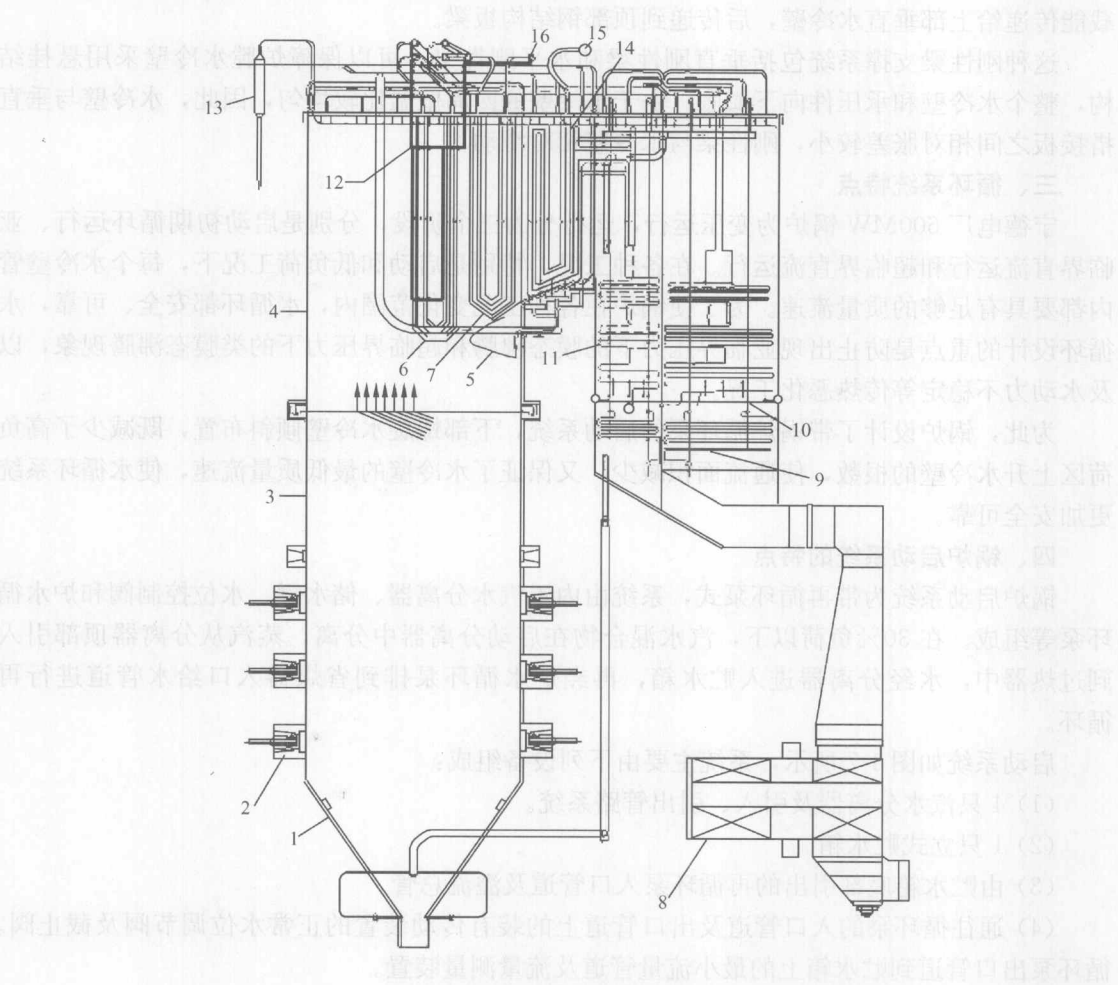


图 1-6 宁德电厂 600MW 锅炉简图

- 1—炉膛冷灰斗；2—燃烧器；3—螺旋水冷壁；4—垂直水冷壁；5—折焰角及管屏；6—屏式过热器；7—高温过热器；8—空气预热器；9—省煤器；10—低温过热器；11—低温再热器；12—夹持管；13—分离器；14—高温再热器；15—高温再热器出口集箱；16—高温过热器出口集箱

二、炉膛水冷壁系统的特点

炉膛水冷壁全为膜式结构，冷灰斗和炉膛下部采用螺旋盘绕水冷壁，上部采用垂直水冷壁，适用于变压运行及锅炉调峰。下部螺旋盘绕管水冷壁管全部采用内螺纹管，可防止水循

环不稳定现象的发生,降低最低质量流速,以得到更低的最小直流负荷;同时,同一管带中管子以相同方式绕过炉膛的角隅部分和中间部分,因此吸热均匀,使得水冷壁出口的介质温度和金属温度非常均匀,水冷壁出口工质温度偏差小,静态敏感性小,为调峰机组安全可靠地运行提供了保证。下部水冷壁与上部水冷壁之间设有过渡段,并设有混合分配集箱。这种布置结构简单,维护工作量小,但安装工作量较大。

螺旋水冷壁类似于水平管壁,与垂直水冷壁相比,其自身能支撑的垂直载荷非常小。因此,在螺旋水冷壁部分采用了带膨胀张力板的垂直搭接板支撑系统,下部炉膛和冷灰斗的荷载能传递给上部垂直水冷壁,后传递到顶部钢结构板梁。

这种刚性梁支撑系统包括垂直刚性梁和水平刚性梁,可以保障炉膛水冷壁采用悬挂结构,整个水冷壁和承压件向下膨胀。由于水冷壁的四周壁温比较均匀,因此,水冷壁与垂直搭接板之间相对胀差较小,刚性梁与水冷壁相对滑动。

三、循环系统特点

宁德电厂 600MW 锅炉为变压运行,运行分为三个阶段,分别是启动初期循环运行、亚临界直流运行和超临界直流运行。在各种工况,特别是启动和低负荷工况下,每个水冷壁管内都要具有足够的质量流速。为了使锅炉在各种工况变化范围内,水循环都安全、可靠,水循环设计的重点是防止出现亚临界压力下的膜态沸腾和超临界压力下的类膜态沸腾现象,以及水动力不稳定等传热恶化工况。

为此,锅炉设计了带锅炉循环泵的启动系统,下部螺旋水冷壁倾斜布置,既减少了高负荷区上升水冷壁的根数,使通流面积减少,又保证了水冷壁的最低质量流速,使水循环系统更加安全可靠。

四、锅炉启动系统的特点

锅炉启动系统为带再循环泵式,系统由内置汽水分离器、储水罐、水位控制阀和炉水循环泵等组成。在 30% 负荷以下,汽水混合物在启动分离器中分离,蒸汽从分离器顶部引入到过热器中,水经分离器进入贮水箱,再经炉水循环泵排到省煤器入口给水管道进行再循环。

启动系统如图 1-7 所示,系统主要由下列设备组成:

- (1) 4 只汽水分离器及引入、引出管路系统。
- (2) 1 只立式贮水箱。
- (3) 由贮水箱底部引出的再循环泵入口管道及溢流总管。
- (4) 通往循环泵的入口管道及出口管道上的装有传动装置的正常水位调节阀及截止阀。循环泵出口管道到贮水箱上的最小流量管道及流量测量装置。
- (5) 通往扩容器的溢流管,装有水位调节阀及截止阀。
- (6) 自省煤器入口到循环泵入口管道的冷却水连接管,流量约为 1%~2% 的泵流量。
- (7) 扩容器。

启动分离器系统为内置式,按锅炉全压设计。锅炉负荷小于 35%BMCR (锅炉最大连续蒸发量) 直流负荷时,分离器起汽水分离作用,贮水箱中的水由 3 只水位控制阀控制排入扩容器或与给水混合后进行再循环,以保证水冷壁中的最小 35%BMCR 的安全流量。锅炉在 35%BMCR 负荷以上运行时,分离器呈干态运行,只作为一个流通元件。

启动分离器为圆形的筒体结构,外径为 $\phi 610$,壁厚为 65mm,材料为 WB36,立式布