



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电站锅炉运行特性

刘彤 主编

非
外
借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电站锅炉运行特性

主编 刘 彤
编写 郭永红 倪永中
主审 孙 键



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以火力发电厂 300、600、1000MW 等容量燃煤机组为重点,系统介绍了自然循环锅炉、控制循环锅炉和超临界压力直流锅炉的运行特性、控制特点,以及不同种类锅炉的燃烧调整方法。全书共分为十章,主要内容包
括典型锅炉及其技术特点、汽包锅炉运行特性、直流锅炉运行特性、锅炉运行参数的监督与调节、锅炉的燃烧特
性及燃烧调整、电站锅炉的启停特性、汽包锅炉的启停、超临界压力锅炉启停、制粉系统的运行特性以及锅炉受
热面异常工况特性及处理等。

本书可作为高等院校能源与动力类专业研究生“锅炉运行特性”课程的教科书,也可作为相关学科本科生
“锅炉运行”课程参考书,还可为有关电力科研部门和设计单位的工程技术人员提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电站锅炉运行特性/刘彤主编. —北京:中国电力出版社,2018.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1676-6

I. ①电… II. ①刘… III. ①火电厂—锅炉运行—高等学校—教材 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 000668 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:李 莉 (010-63412538)

责任校对:王开云

装帧设计:郝晓燕

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018 年 8 月第一版

印 次:2018 年 8 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:15.25

字 数:369 千字

定 价:45.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

本书介绍了大型电站锅炉的运行特性，是在华北电力大学热能工程、动力工程专业硕士研究生多年使用的讲义基础上编写而成的。

全书针对电站大型锅炉，特别是亚临界、超临界和超超临界压力锅炉，着重分析锅炉状态参数的静态特性和动态特性、锅炉的启停特性、锅炉运行参数的监督与调节、锅炉的燃烧调整与经济运行、制粉系统的运行调节以及锅炉受热面的安全运行等内容。

书中收集了国内外电站煤粉锅炉最新技术，并结合国内电站锅炉运行的实际案例，介绍了锅炉运行相关的最新研究成果、研究方法，以培养学生分析和解决问题的能力。

本书由华北电力大学刘彤教授任主编，倪永中副教授和郭永红讲师参与编写。刘彤编写一~八章，倪永忠编写第九章，郭永红编写第十章。

本书由东北电力大学孙键教授审阅，主审老师提出了许多宝贵意见和建议；研究生赵雨兰、赵鑫、张慧职等在资料收集及文字编辑方面也投入了较多的时间和精力，在此一并表示感谢。

限于编者水平，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者
2018年6月

目 录

前言	
第一章 典型锅炉及其技术特点	1
第一节 我国电站锅炉发展概况.....	1
第二节 电站锅炉技术特点.....	3
第三节 典型电站锅炉.....	11
第二章 汽包锅炉运行特性	18
第一节 汽包锅炉静态特性.....	18
第二节 汽包锅炉动态特性.....	25
第三章 直流锅炉运行特性	34
第一节 静态特性.....	34
第二节 动态特性.....	37
第四章 锅炉运行参数的监督与调节	44
第一节 汽包锅炉运行参数监督与调节.....	44
第二节 直流锅炉运行参数的调节.....	65
第三节 单元机组调峰与变压运行.....	72
第四节 火电机组灵活性提升.....	79
第五章 锅炉的燃烧特性及燃烧调整	90
第一节 锅炉燃烧系统静态特性.....	90
第二节 燃料量与风量的调节.....	94
第三节 燃烧器的调节及运行方式.....	98
第四节 燃煤锅炉的经济运行.....	118
第六章 电站锅炉的启停特性	134
第一节 启停过程的经济性.....	134
第二节 启停过程的安全性.....	137
第三节 启停过程的寿命损耗特性.....	147
第四节 启停过程燃烧特性.....	151
第七章 汽包锅炉的启停	157
第一节 自然循环锅炉的启停过程.....	157
第二节 控制循环锅炉的启停过程.....	161
第三节 汽包锅炉启停过程的关键问题.....	164
第四节 汽包锅炉的启停曲线.....	165
第八章 超临界压力锅炉启停	168
第一节 超临界压力锅炉启动旁路系统.....	168

第二节	超临界压力直流锅炉启动过程·····	174
第三节	启动过程中的关键问题·····	176
第四节	超临界压力锅炉的启动曲线·····	178
第九章	制粉系统的运行特性·····	182
第一节	中间储仓式制粉系统的运行特性及调节·····	182
第二节	中速磨直吹式制粉系统的运行特性及调节·····	189
第三节	双进双出钢球磨直吹式制粉系统的运行特性及调节·····	194
第四节	制粉系统的启动和停运·····	199
第十章	锅炉受热面异常工况特性及处理·····	202
第一节	氧化皮产生及剥离特性与防治·····	204
第二节	炉内结渣与水冷壁高温腐蚀特性及其防治·····	207
第三节	超临界压力直流锅炉水冷壁超温·····	214
第四节	过热器和再热器的超温及高温腐蚀·····	220
第五节	省煤器的磨损和防磨措施·····	224
第六节	回转式空气预热器的低温腐蚀和积灰·····	230
参考文献	·····	235

第一章 典型锅炉及其技术特点

第一节 我国电站锅炉发展概况

我国电力工业发展迅速,尤其近三十年更可谓突飞猛进。电站锅炉在数量上和技术水平上有了质的飞跃。在 20 世纪 50 年代,主力机组仅是容量 120~230t/h、参数 3.83MPa、450℃的自然循环煤粉锅炉;20 世纪六七十年代,主力机组发展为高温高压(7.8~14.7MPa, 535~540℃)的 125MW 和 200MW 再热机组,并建造了一批 1000t/h 的 UP 型直流锅炉,同时引进了 300MW 和 500MW 的低循环倍率锅炉,在燃烧技术方面也发展了液态排渣炉和小型鼓泡流化床炉;1978 年是我国锅炉技术发展历史的重要转折点,加快了设备和技术的引进,300~600MW 亚临界压力(约 18MPa, 540℃)控制循环锅炉机组逐渐成为主力,设计、制造、安装和运行水平得到大幅度的提升,达到了世界先进水平。进入 21 世纪后,随着高速的经济发展,节约能源和环保要求日益严格,我国火电机组进入了向 1000MW、超临界和超超临界参数发展的新时期,其发展速度之快和建设周期之短在世界上都是创纪录的。整个过程可分为如下几个阶段。

第一阶段:初建、学习、创业。

从 1949 年到 20 世纪 50 年代末,是我国电站锅炉发展的初级阶段。从无到有,依赖苏联、捷克斯洛伐克、波兰等国的技术,生产锅炉的容量为 40、65、130t/h,压力为 3.8MPa,过热汽温 450℃。该阶段我国为了掌握电站锅炉的设计及制造技术、锅炉运行技术,在部分大学开办了锅炉专业和热能专业。为我国电站锅炉的技术发展,成立了原第一机械工业部汽轮机锅炉研究所。与此同时,国家向苏联和东欧国家派遣了一批锅炉相关专业的留学生。

由国家投资、全国各地支援并在苏联及捷克斯洛伐克的援助下建立了以生产大型电站锅炉为主的哈尔滨锅炉厂;以生产中、低压锅炉为主的武汉锅炉厂;国家向上海锅炉厂投资,提高其生产力。

第二阶段:发展壮大、自力更生。

1960 年到 1980 年的 20 年中,我国的锅炉制造发扬独立自主、自力更生的精神,设计技术、制造工艺、生产装备都得到明显提高。在此期间,我国自主研发的电站锅炉品种、容量、参数都有较大发展;有燃烧煤、油锅炉,也有燃烧黑液、废气及生物质燃料的特种锅炉;有自然循环锅炉,也有直流锅炉;在这一阶段,锅炉参数经历了中温中压、高温高压到超高压和亚临界压力;蒸汽从一次过热到二次过热;水循环方式由自然循环到直流锅炉的发展过程。

我国直流锅炉的研究和发展经历了漫长且曲折的道路。早在 1958 年,当时的上海汽轮机锅炉研究所就开始了直流锅炉的研究,于 1959 年底建成了 12t/h、9.8MPa/510℃的拉姆辛式螺旋管圈直流锅炉试验炉,通过多次试验解决了管间脉动等问题。在此基础上,由上海锅炉厂设计制造了 220t/h 的直流锅炉,1968 年 10 月在上海杨树浦发电厂投入运行。1973

年8月,我国首台125MW拉姆辛式直流锅炉在秦岭电厂投入运行。1975年9月,我国首台由上海锅炉厂设计制造的300MW UP型直流锅炉在姚孟电厂运行。

这一阶段东方锅炉厂从四川盆地崛起,在我国迅速形成哈尔滨、上海、东方三大锅炉集团及武汉锅炉集团共同发展的格局。

第三阶段:引进技术、消化吸收、优化提高、建立自主的具世界先进水平的产品开发体系。

20世纪80年代初引进了美国CE公司的亚临界300、600MW控制循环锅炉设计制造技术,并围绕首台300MW机组进行了一系列重大技术攻关。首台引进型1025t/h控制循环中间再热锅炉1983年由上海锅炉厂制造,于1987年7月12日在山东石横电厂正式运行;首台引进型600MW控制循环锅炉由哈尔滨锅炉厂生产,于1989年11月14日在安徽平圩电厂正式投运。

1985年12月,东方锅炉厂自主开发的亚临界压力300MW自然循环锅炉于山东邹县电厂投运,该锅炉主要性能达到进口机组水平。

在这一阶段,我国锅炉的设计、制造及运行水平逐步接近国际先进水平;同时还分别与世界著名的锅炉制造公司(如福斯特惠勒、苏尔寿、B&W、三菱等)合作,广泛学习国外先进技术,生产能力也迅速提高,各企业在满足国内市场需求的的同时,向国际市场迈进。分别向东南亚、非洲、南美洲、东欧等地区出口我国制造的大容量电站锅炉。

第四阶段:跟随世界技术发展趋势,自主开发新一代环保型、大容量、高参数锅炉机组。

20世纪末,在引进消化吸收的基础上,锅炉制造行业、研究单位、高等院校联合开展了引进机组的优化工作,在此基础上紧跟国内电力市场的需要,不失时机地自主研发了300、600MW等级的亚临界压力锅炉以及600MW等级的超临界压力锅炉,锅炉的管圈形式、燃烧方式也各不相同。

物理学定义水与水蒸气的临界状态点为压力22.125MPa、温度374.15℃,当锅炉出口主蒸汽参数高于临界点,则称为超临界压力锅炉。超超临界压力锅炉是相对于超临界压力锅炉而言的,它没有明确的物理学意义,而是人为规定的一种高参数锅炉。不同国家对超超临界压力锅炉的定义并不完全相同,国际上通常把主蒸汽参数达到压力25~31MPa、温度580~610℃的锅炉称为超超临界压力锅炉。随着锅炉机组蒸汽参数的提高,锅炉效率将得到大幅提高,而污染物的排放则会大幅下降,主蒸汽压力每上升1MPa,机组热效率提高0.18~0.29个百分点;主蒸汽或再热蒸汽温度每上升10℃,机组热效率提高0.25~0.3个百分点。超超临界压力火电机组是目前国际上参数最高,最先进的高效、节能、低排放的发电设备,可大幅度提高机组效率。表1-1为典型的超临界与超超临界压力机组经济性对比。

表 1-1 典型的超临界与超超临界压力机组经济性对比

项目	单位	超超临界参数	超临界参数
主蒸汽压力	MPa	27.46	25.4
主蒸汽温度	℃	605	571
锅炉效率	℃	93.88	92.72
电厂效率	%	45.39	43.75
发电煤耗	g/kWh	270.6	281.65
厂用电率	%	4.45	5.573
供电煤耗	g/kWh	283.2	298.28

目前超超临界压力机组的发展方向主要有两种：一种是提高蒸汽温度，其主要代表为日本（三菱、东芝、日立）；一种是提高蒸汽压力，其主要代表为欧洲（西门子、阿尔斯通）。此两种方式都可达到提高机组整体效率的目的，其发展的主要限制因素为能够承受高温、高压的材料的研发，我国已经启动了 700℃ 等级超超临界压力发电技术的研究工作。我国三大锅炉厂的超超临界压力技术来源见表 1-2。

表 1-2 我国三大锅炉厂的超超临界压力技术来源

厂 家	时 间	技 术 来 源
哈尔滨锅炉厂	2004 年	日本三菱重工 500~1200MW 超超临界压力锅炉 美国 ALSTOM 公司 500~1000MW 超超临界压力 II 型锅炉
上海锅炉厂	2003 年	德国 ALSTOM 公司 500~1000MW 超超临界压力 II 型锅炉 600MW 等级超超临界压力锅炉技术自主开发
东方锅炉厂	2004 年	日本日立公司超超临界压力锅炉

目前，上海锅炉厂共生产两种类型的 1000MW 等级超超临界压力直流锅炉。其中一种是 1000MW 等级超超临界压力塔型直流锅炉，变压运行，一次（或二次）中间再热，四角切圆燃烧低 NO_x 燃烧系统；所有受热面均为水平布置，容易疏水；蒸汽参数：压力 26~33MPa，过热蒸汽出口温度 605℃；燃料为烟煤、贫煤等。另一种是 1000MW 等级超超临界压力 II 型直流锅炉；变压运行，一次（或二次）中间再热，双切圆燃烧低 NO_x 燃烧系统；蒸汽参数：压力 26~33MPa，过热蒸汽出口温度 605℃；燃料为烟煤、贫煤等。

第二节 电站锅炉技术特点

一、锅炉本体布置方式

锅炉本体的布置形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，锅炉本体的布置形式既与锅炉的容量、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形式。大型锅炉常见的本体布置形式有以下几种：

1. II 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，广泛采用这种布置形式。它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形式，如图 1-1 所示。II 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) 在水平烟道中可采用支吊方式比较简单的悬吊式受热面。

(4) 在尾部垂直下降烟道中，受热面易布置成逆流传热方式，强化对流传热。

(5) 下降烟道中，气流向下流动，吹灰容易并有自吹灰作用。

(6) 尾部受热面检修方便。

(7) 锅炉本身及锅炉和汽轮机之间的连接管道都不太长。

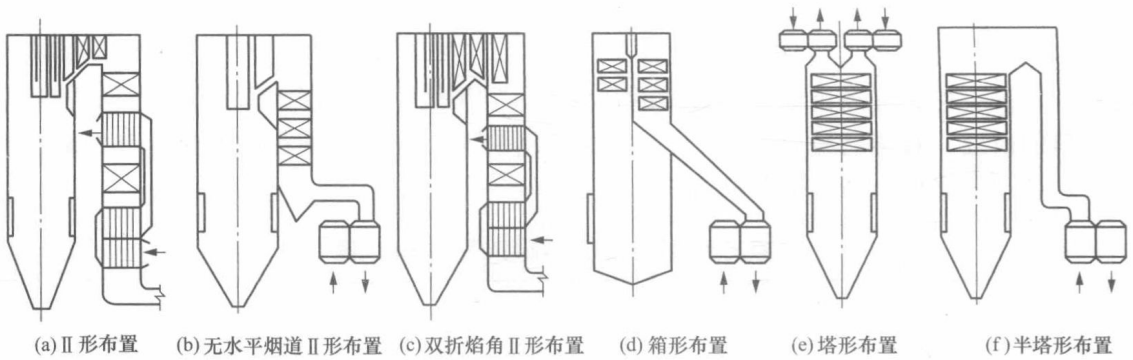


图 1-1 锅炉布置形式

但这种形式也有缺点，主要有：

- (1) 占地面积大。
- (2) 由于有水平烟道，使锅炉构架复杂，而且不能充分利用其所有空间来布置受热面。
- (3) 由于有水平烟道，烟气在炉内流动要经两次转弯，造成烟气在炉内的速度场、温度场和飞灰浓度场不均匀，影响传热效果，并导致对流受热面局部飞灰磨损严重。

(4) 由于锅炉高度低，又要求下降烟道与锅炉高度基本相近，因而在大容量锅炉中，在尾部烟道中要布置足够的尾部受热面便有困难，特别是在燃用低发热值的劣质煤时更显得突出。

2. Γ 形布置

Γ 形布置实质上是 Π 形布置的一种改进，这种布置如图 1-1 (b) 所示， Γ 形布置只是取消了 Π 形布置中的水平烟道，其他则大致相同。因此，它保留了 Π 形布置的许多优点，但却布置紧凑，可节省钢材，而且占地面积小；但尾部受热面的检修不方便。大容量锅炉如果采用管式空气预热器时，因为不便支吊，而且尾部烟道高度不够，就不宜采用这种布置。但如果采用回转式空气预热器时，则采用这种布置形式比较适宜。

双折焰角 Π 形，如图 1-1 (c) 所示的目的是改善烟气在水平烟道的流动情况，利用转弯烟室的空间，在水平烟道部分布置更多的受热面。

如果要采用管式空气预热器，为解决尾部受热面布置不下的困难，也可将尾部烟道对称地分成左右两个，形成 Γ 形布置。

3. 塔形布置

图 1-1 (e) 为塔形布置方案，下部为炉膛，对流烟道就布置在炉膛上方，锅炉本体形成一个塔形，优点如下：

- (1) 占地面积小。
- (2) 取消了不宜布置受热面的转弯室，烟气流动方向一直向上不变，可大大减轻对流受热面的局部磨损，因此，对燃用多灰分的燃料特别有利。
- (3) 锅炉本身有自身通风作用，烟气流动阻力也较小。
- (4) 对流受热面可全部水平布置，易于疏水。

但这种方案也有以下缺点：

- (1) 锅炉本体高度很高，过热器、省煤器、再热器等对流受热面都布置在很高位置，连接的汽水管道较长。

(2) 空气预热器、送风机、引风机及除尘器等笨重设备都布置在锅炉顶部，加重了锅炉构架和厂房的负载，因而造价高。

(3) 安装及检修均较复杂。

因我国具体情况，较少采用这种方案，但在燃用灰分很多的固体燃料时，也有采用这种布置的。

为了减轻转动机械及笨重设备施加给锅炉构架的负载，便把空气预热器、送风机、引风机、除尘器及烟囱等都布置在地面，形成半塔形布置，如图 1-1 (f) 所示。

4. 箱形布置

箱形布置中下部为炉膛，上部分隔成两个串联的对流烟道，形成一个箱形的结构，如图 1-1 (d) 所示。

表 1-3 为我国国内制造的 1000MW 超超临界压力锅炉的炉型技术对比。

表 1-3 我国国内制造的 1000MW 超超临界压力锅炉的炉型技术对比

项目	哈尔滨锅炉厂	上海锅炉厂	上海锅炉厂	东方锅炉厂、北京巴威公司
锅炉炉型	II 形	II 形	塔式	II 形
燃烧方式	单炉膛八角切圆	单炉膛八角切圆	单炉膛四角切圆	单炉膛前后墙对冲
燃烧器形式	直流摆动燃烧器	直流摆动燃烧器	直流摆动燃烧器	旋流燃烧器
技术源头	CE-MHI	ALSTOM	ALSTOM	Babcock
水冷壁类型	均采用内螺纹螺旋垂直管圈	下部采用内螺纹螺旋管圈，上部采用垂直管圈	下部采用内螺纹螺旋管圈，上部采用垂直管圈	下部采用内螺纹螺旋管圈，上部采用垂直管圈
启动系统	带启动循环泵	带启动循环泵	带启动循环泵	带启动循环泵
最小直流负荷 (%)	25	30	25	25~30
再热器主要调温方式	烟气挡板+摆动燃烧器	烟气挡板+摆动燃烧器	烟气挡板	烟气挡板

二、汽水流动方式

国内目前电站锅炉主要有自然循环、控制循环和直流锅炉三种形式。直流锅炉适合于超临界压力及亚临界压力参数，自然循环及控制循环只适宜于亚临界压力以下参数。

1. 自然循环汽包锅炉

自然循环汽包锅炉的主要特点是流动方式简单、运行可靠，在以往的电站锅炉中采用自然循环锅炉是相当普遍的。在美国，为了保证机组的可用率，20 世纪 70 年代订购的大部分电站锅炉都是亚临界压力自然循环汽包锅炉，并设计成能超压 5% 运行。

自然循环主要依靠下降管内水的平均密度与水冷壁内汽水混合物的平均密度之差而进行，由于它们的密度差形成一定的流动压头，从而使蒸发受热面内工质达到往复循环。另外，由于自然循环锅炉具有能适应炉膛内吸收热量变化而进行自调节的优点，因此吸收热量最多的管子通过的水量也最多，可防止传热不均匀现象的产生。自然循环不需用循环泵，故投资及运行费用均可减少。

在炉膛高热负荷区域，为使管子得到充分冷却并维持核态沸腾，需要一定的质量流速，而这种流速随着汽包运行压力的升高而增加。现已证明，采用光管的自然循环能够达到这种流速，但它防止偏离核态沸腾的能力较小，特别在不稳定工况下更是如此，有可能产生膜态沸腾，但可用内螺纹管（不设置循环泵）来提高核态沸腾的可靠性。即使压力达到 20.678MPa 时，其循环可靠性仍然很好。北京巴威公司根据其在亚临界压力直流锅炉上为防止膜态沸腾而采用内螺纹管的经验，在自然循环汽包锅炉上亦加用内螺纹管，以保证循环可靠，使其成为保证炉膛水冷壁达到充分冷却的最简单、有效及可靠的方法。

2. 控制循环锅炉

控制循环锅炉是美国燃烧工程公司（CE）的专利，我国哈尔滨锅炉厂和上海锅炉厂也引进此种锅炉的制造技术，第一、第二台 600MW 级的控制循环锅炉在安徽平圩电厂投运，之后在国内不少电厂安装了这种类型 600MW 级的锅炉。控制循环锅炉的主要特点是在锅炉循环回路的下降管和上升管之间加装循环泵以提高循环回路的流动压头，因此汽包及上升管、下降管可采用较小的直径。但是加装辅助循环泵，运行时需消耗一定的功率，一般情况下循环泵消耗功率相当于锅炉功率的 0.3%~0.4%。

3. 直流锅炉

直流锅炉是大容量锅炉发展方向之一。特别是采用超临界参数的锅炉，直流锅炉是唯一能采用的锅炉形式。本生型直流锅炉发源于德国，早期本生型锅炉的炉膛蒸发受热面管子是多次上升垂直管屏，用中间混合联箱与不受热的下降管互相串联。因此每个管屏侧边的管子与相邻管屏中的侧边管子有一定的温差、会产生一定的热应力，对膜式水冷壁的焊缝会起破坏作用。通用压力型锅炉（UP 炉）是北京巴威公司在本生炉基础上加以改进的一种炉型，所谓通用压力型锅炉是指无论亚临界或超临界参数，均可采用的炉型。UP 炉的主要特点是采用全焊膜式水冷壁，工质一次或二次上升，连接管多次混合，每个回路焓增较小，并有较高的质量流速，可保持水冷壁可靠的冷却。采用内螺纹管以防止蒸发段产生膜态沸腾。对于 UP 炉来说一般用于大型超临界压力直流锅炉，以确保水冷壁管内的质量流速。

不论本生型直流锅炉或一次垂直上升的 UP 型直流锅炉，由于水冷壁系统中有混合联箱，不适应大容量机组变压运行的要求。在变压运行中，随着锅炉压力下降、机组负荷下降，当在低压运行时，蒸发受热面中工质温差的大幅度变化以及汽水混合物难以从中间混合联箱出口进行均匀分配等问题，使这种直流锅炉管屏形式（垂直上升）不能与之相适应。因此北京巴威公司、德国斯坦缪勒公司等人在炉膛的辐射受热面的结构形式上相继采用螺旋上升管圈。管圈自炉膛底部冷灰斗沿炉膛四周盘旋上升至炉膛折焰角处，炉膛上部管屏改为垂直上升管屏，以利于管子穿墙及悬吊结构的布置。螺旋管圈除进出口联箱外，中间不设置混合联箱，这种管圈的优点是热偏差小，且因无中间混合联箱，不会产生汽水混合物不均匀分配的问题，因此可做成全焊接的膜式水冷壁管圈，这是本生型锅炉的一大改革。采用螺旋管水冷壁具有如下的优点：

（1）蒸发受热面采用螺旋管圈时，管子数目可按设计要求而选取，不受炉膛大小的影响，可选取较粗管径以增加水冷壁的刚度。

（2）螺旋管圈热偏差小，工质流速高，水动力特性比较稳定，不易出现膜态沸腾，又可防止产生偏高的金属壁温。

（3）因无中间混合联箱，不会产生汽水混合物不均匀分配的问题。

(4) 带循环泵系统, 启动及低负荷运行的热损失较小, 可以提高机组的效率。循环泵只在 15%~35% 负荷时才使用, 故泵的功率消耗较小。

(5) 因启动有汽水分离器, 使蒸发受热面与过热受热面有比较明显的分界线, 易于处理调节系统。

(6) 螺旋形管圈对燃料的适应范围比较大, 可燃用挥发分低、灰分高的煤。

(7) 能变压运行, 快速启停, 能适应电网负荷的频繁变化, 调频性能好。

螺旋管圈虽有以上优点, 但它的结构与制造工艺复杂, 故制造与安装比较困难, 所需工期较长。

内螺纹垂直水冷壁形式在支吊、安装及运行等方面具有较大的优越性, 尤其是锅炉容量增大以后, 许多问题都自然解决了, 也是重要的发展方向。内螺纹垂直管屏水冷壁有以下优点:

(1) 水冷壁阻力较小, 可降低给水泵耗电量, 其水冷壁的总阻力仅为螺旋管圈的一半左右。

(2) 与光管相比, 内螺纹管的传热特性较好。

(3) 安装焊缝少, 减少了安装工作量和焊口可能泄漏概率, 同时缩短了安装工期。

(4) 水冷壁本身支吊, 且支撑结构和刚性梁结构简单, 热应力小, 可采用传统的支吊形式。

(5) 维护和检修较易, 检查和更换管子较方便。

(6) 比螺旋管圈结渣轻。

缺点:

(1) 水冷壁管径较细, 内螺纹管相对于光管来说价格较高, 一般高出 10%~15%。需装设节流孔圈, 增加了水冷壁和下联箱结构的复杂性, 节流圈的加工精度要求高, 调节较为复杂。

(2) 机组容量会受垂直管屏管径的限制, 对容量较小机组, 其炉膛周界相对较大, 无法保证质量流速。

三、过热器、再热器系统

大型锅炉的过热器一般采用多级布置, 严格控制每一级的焓升, 以防止热偏差过大。基本采用辐射—对流组合式, 包括顶棚、包覆、低温过热器、分隔屏过热器、后屏过热器和高温过热器等几个部分。顶棚过热器和包覆过热器布置在低温区域, 吸热少, 传热效果差。过热器是锅炉中将一定压力下的饱和蒸汽加热成相应压力下的过热蒸汽的受热面, 降低排烟损失, 提高锅炉热效率。高低温过热器的区别是位置不同, 高温过热器位于炉膛出口处, 低温过热器位于水平烟道。以上是超临界压力锅炉过热器的一般形式, 不同的锅炉布置会略有不同。

由于辐射式和对流式的汽温特性正好相反, 同时采用辐射式和对流式联合布置的过热器与再热器系统, 可得到比较平缓的汽温特性。300MW 亚临界压力锅炉采用包括有壁式、屏式和末级对流式组成的高温布置再热器系统, 锅炉负荷在 50% 至额定负荷范围变化时, 再热蒸汽温度都能维持额定值。一般电站锅炉过热器由屏式和对流式组合, 因辐射吸热份额不够大, 整个过热器汽温特性仍是对流式的。

对汽温调节方法的基本要求是: 调节惯性或延迟时间小, 调节范围大, 对循环热效率影响小, 结构简单可靠且附加设备消耗少。

现代大型电站锅炉常用的汽温调节方法有喷水减温、分隔烟道挡板调节和摆动燃烧器。前一种属蒸汽侧调节方法，后两种属烟气侧调节方法。一般切圆燃烧搭配摆动燃烧器调节再热汽温，墙式燃烧搭配分隔烟道挡板调节再热汽温。而对于直流锅炉，无论过热和再热汽温，首先是煤水比调节，其他的调节作为细调和精调。

过热器、再热器的运行安全要求在某种程度上要高于水冷壁。目前，对于超超临界压力锅炉过热器、再热器水动力设计技术和运行技术已经比较成熟，而且在超临界参数下，水动力特性要优于亚临界。但是现在 1000MW 超超临界压力锅炉的主蒸汽/再热蒸汽温度已经升高到 605℃/603℃，已经达到当前金属材料所能承受的极限，加之锅炉容量的增加，热偏差也随之增大，所以对于锅炉过热器、再热器而言必须周密设计，稍有不慎就会产生严重后果。

四、燃烧系统

煤粉的燃烧方式，主要有切向燃烧方式（四角、六角或八角）、墙式燃烧方式（前后墙对冲燃烧）和 W 型火焰燃烧方式（拱式燃烧）三种。

1. 切圆布置的直流燃烧器

切圆燃烧中四角火焰的相互支持，一次风、二次风的混合便于控制，其煤种适应性很强，可以燃用各种低挥发分和高灰分的煤种，适合我国燃煤电站锅炉煤种多变和煤质逐渐变差的特点，目前投运的超临界压力机组较多采用切圆燃烧方式。

(1) 采用高调节比的煤粉喷嘴。为了提高低负荷时燃烧的稳定性，美国燃烧工程公司对一次风喷嘴的结构作了改进。在煤粉喷嘴管内装置水平肋片，并改进了喷嘴头部的装配，使喷嘴出口截面和入口截面相等，而喉口截面积约为入口截面积的 95%，这样使喷嘴出口速度降低。这一改进的主要目的是有意识地利用煤粉气流在一次风管内转弯后煤粉的分离作用，使喷嘴上半部出口气流的煤粉浓度较高，以利于煤粉着火，也适当降低了一次风出口速度。在此基础上，燃烧工程公司又发展了一种新的一次风喷嘴，并称为高调节比喷嘴。

(2) 低 NO_x 燃烧器。用两级燃烧（或称分级燃烧），即用约 80% 的空气量从下部燃烧器喷口送入，使下部风量小于完全燃烧所需风量（即富燃料燃烧），从而降低燃烧区段温度，使 NO_x 的反应率下降，此时有些氮得不到氧，复合为 N_2 ， NO_x 就会减少（即燃烧过程延迟），然后再从上部燃烧器喷口送入其余约 20% 的空气（即富空气燃烧）以达到风煤燃烧平衡。两级燃烧不但能抑制生成 NO_x ，而且也能抑制空气中的氮在高温下与氧反应生成的 NO_x ，这是控制 NO_x 较为有效的方法。利用这一原理，CE 公司在大容量煤粉炉上普遍推广采用燃尽风（over fire air, OFA），即在角置式直流燃烧器喷口的最上端再布置 2~3 层燃尽风喷口，将 10%~25% 总风量的风从此处送进炉膛上部。目前从 CE 引进设备或引进 CE 技术制造的 600MW 级锅炉的角置式直流燃烧器的最上方都布置了两层燃尽风喷口。

(3) 减少四角切圆燃烧锅炉的炉膛出口水平烟道左右两侧烟温差、流速偏差及防止过热器、再热器局部超温爆管，对 600MW 以上机组的安全运行有极为重要的意义。

锅炉过热器、再热器各管存在汽温偏差的根本原因在于各管的传热、流动特性不同。通常，引起汽温偏差的因素包括：吸热偏差、流量偏差、结构偏差及进口汽温偏差。在四角布置切圆燃烧的锅炉中，沿烟道宽度各管之间的吸热偏差是造成汽温偏差的最主要的原因之一。

切圆燃烧方式的锅炉，由于炉膛出口气流残余旋转的影响，会引起在水平烟道左右两侧

存在一定的速度偏差及温度偏差，从而造成两侧对流传热系数及温压的不同，这是沿烟道宽度左右两侧存在吸热偏差的最主要原因。随着锅炉容量的增加，水平烟道中的速度偏差及烟温偏差有增大的趋势。通过对国产 200、300MW 及 600MW 机组锅炉炉内空气动力场的模化实验发现，水平烟道左右两侧平均速度之比分别可达 1.24、2.0 和 2.15。这一增加趋势是锅炉从小容量向大容量发展过程中的内在因素造成的。随着锅炉容量的增大，炉膛出口水平烟道左右侧烟气流速及烟温偏差增加，引起烟道中过热器及再热器各管传热温压及对流传热系数的不同，造成过热器与再热器的吸热偏差。因而，对于大容量电站锅炉，特别是 600MW 机组锅炉，如何减少过热器与再热器的吸热偏差是个非常重要的问题。

如前所述，沿烟道宽度各管的吸热偏差是由于炉膛出口气流的残余旋转导致了水平烟道左右侧烟气流速和温度偏差所引起。因此，降低沿烟道宽度各管之间的吸热偏差的根本途径在于削弱炉膛出口气流的残余旋转。通过适当控制一、二次风动压比和使部分射流风反切，将一次风或部分二次风、燃尽风射流与主体旋转气流反切，可以削弱炉膛出口气流残余旋转，降低水平烟道左右侧烟气流速偏差。另外，在两级过热器、再热器之间安装混合联箱或左右交叉系统也是十分必要的，特别是对于再热器（因为再热蒸汽压力低、比热容小，汽温偏差更大）更有必要。

同时为了防止大容量锅炉切圆燃烧炉膛出口烟气流存在残余旋转，使炉膛出口烟温及烟量分布偏差加剧，导致炉膛出口过热器与再热器区域烟温偏大，ALSTOM-CE 率先使用了单炉膛反向双切圆燃烧技术，后来三菱重工引进这种燃烧技术的专利设计了多台超临界和超超临界压力机组。由于双切圆燃烧技术增加了燃烧器数量，降低了单只燃烧器的负荷，可以有效防止结渣，保证燃尽，使炉膛内热负荷分布均匀，炉膛出口烟温偏差降低。因此，采用单炉膛双切圆燃烧技术已成为 Π 形布置切圆燃烧锅炉超大型化后的发展趋势。

2. 墙式布置旋流燃烧器

采用分级燃烧的方式、降低 NO_x 的生成率。所谓分级燃烧亦常称“偏离化学当量燃烧”，它是将一部分小于化学当量的空气引入燃烧器，而将其余空气由燃尽风口引入炉膛，这样可降低燃烧区域的过量氧量，以减少 NO_x 的生成量。一次风设计风率一般为 15%~25%，二次风设计风率为 60%~70%，在燃烧器最顶部设置约 15% 的燃尽风（OFA），以实现二级燃烧，控制 NO_x 生成。这种布置方式可实现燃料燃烧分三个阶段完成，避免高温和高氧浓度这两个条件同时出现，以抑制 NO_x 和 SO_2 的生成量。燃烧过程中煤粉气流首先与少量根部二次风混合，浓相煤粉迅速、稳定燃烧，但这部分空气只能使挥发分基本燃尽和焦炭被点燃，其后与二次风迅速混合，强烈燃烧使火焰中心形成，但是火焰中心区域的氧浓度有限，前面两个阶段进入的总空气量略小于理论空气量，还处于一定的还原气氛，使 NO_x 具有良好的裂变还原条件。最后是燃尽风助燃，使前两阶段未能燃尽的可燃物燃尽，此时虽然氧浓度较高，但燃烧已处于火焰中心区域之外，温度低而 NO_x 生成量较少。

目前国内 600MW 以上机组的旋流燃烧器多为双调风切向叶片式旋流燃烧器，在不少资料中也称为低 NO_x 的燃烧器，其设计的思想是使燃烧过程按二段燃烧方式进行，达到稳燃和遏制 NO_x 生成量的目的。

对于旋流燃烧器来说，它单个燃烧器基本上是一个独立的火焰，燃烧过程都在近燃烧器出口区域基本完成，为使过程按二段燃烧方式进行，就需要在每个燃烧器的火焰区域都形成燃料过浓和过稀的区域，然后二者再进行混合。将二次风分成风量和旋转强度分别可调的两

股,其目的即在于此。使内二次风与煤粉气流间的混合以及内、外二次风间的混合可分别控制。煤粉气流因与内二次风的混合而被带动旋转,形成回流区抽吸已着火前沿的高温介质,构成一个燃料浓度高的内部着火燃烧区域,这一区域内燃烧工况可通过内二次风的旋转强度和风量,亦即内二次风的挡板开度调节。外二次风与内二次风及煤粉气流的混合使在内部燃烧区域的外缘构成一个燃料过稀的燃烧区域,燃尽过程随着二者的混合而进行与完成。混合过程也可通过挡板开度进行控制。 NO_x 及 SO_x 的生成同样因内部燃烧区内的氧气浓度低而受到遏制,也同样因外部燃料过稀区域中温度相对较低而受到遏制。因此它与直流燃烧器一样,是通过使生成 NO_x 的两个主要因素(氧浓度及温度)不同时具备而达到遏制的目的。

旋流式燃烧器前后墙对冲布置 Π 形锅炉炉膛截面可布置为长方形,则炉膛出口高度降低呈长方形,解决了四角切向燃烧 Π 形炉存在的炉膛出口水平烟道左右侧的烟温偏差大及其左、右侧主蒸汽及再热蒸汽温差较大的问题。旋流式燃烧器前后墙对冲布置和直流式燃烧器切向布置相比,其主要优点是上部炉膛宽度方向上的烟气温度和速度分布比较均匀,使过热蒸汽温度偏差较小,并可降低整个过热器和再热器的金属最高点温度。

3. W形火焰锅炉

与常规的煤粉锅炉相比,W形火焰锅炉不同的是它的燃烧室由下部的着火炉室和上部的辐射炉室组成。其中,下炉室大面积布置了卫燃带以确保无烟煤的稳定燃烧,上炉室大量布置了水冷壁、屏式过热器等吸热面,以确保出口烟温保持在合适的温度。着火炉室的深度比辐射炉室大80%~120%。前后墙突出部分的顶部构成拱体,拱体倾斜。煤粉气流和二次风喷嘴装设在拱体上,前、后墙下喷的煤粉气流较多地接触到高温回流的烟气,提高火焰根部的温度水平,有利于低挥发分煤的着火。在着火炉室下部与另一股空气射流相遇后折转向上,沿炉室中轴线上升,从而形成W形火焰。由于火焰先下行后上行,增加了煤粉在炉内的停留时间,有利于燃料的燃尽。

国际上公认W形火焰锅炉在稳燃能力、降低 NO_x 排放、防止结渣、最低不投油稳燃负荷及调峰方面具有显著的优势。我国的煤炭储量丰富,而且低挥发分的贫煤和无烟煤约占19%,是世界上少数贫煤和无烟煤储量丰富的国家之一。随着无烟煤的进一步开发,为有效利用能源,电力工业燃用贫煤、无烟煤的数量还将增长。因此,W形火焰炉是今后主要采用的炉型之一。

W形火焰燃烧方式对难燃的贫煤及无烟煤在燃烧稳定性上优于四角和墙式燃烧方式,但是,由于炉膛截面积大,形状复杂,锅炉本体造价大致要增加20%。另外,形成和控制W形火焰使其充满整个炉膛,要求成熟的设计经验和较高的运行水平。

4. 炉膛结构设计

炉膛设计有三个因素。首先炉膛容积应足够大,使燃料完全燃烧,并具有足够的受热面使烟气进入对流烟道前得到充分冷却。其次需将 NO_x 的生成量限制到可被接受的程度。最后应使烟气流量保持均匀,使炉膛出口温度维持稳定,以防锅炉对流受热面产生结渣、堵灰及金属超温等问题。

根据大量经验分析,造成炉膛结渣有四个因素:每只燃烧器的热输入量、燃烧器与侧墙及灰斗的距离、炉膛单位截面上的热输入量及燃烧器区域的热负荷。某公司设计的锅炉,不论容量大小,单只燃烧器热输入量一直保持较低水平,燃烧器与侧墙、灰斗及燃烧器之间的

距离都加大了。炉膛单位截面的热输入量根据结渣情况不同而定为 $4.85\sim 5.82\text{MW}/\text{m}^2$ ，燃烧器区域的热负荷降低了 $30\%\sim 45\%$ ，使火焰尖端温度降低以满足限制 NO_x 生成的要求，并减少结渣的可能性。同时，为了减少对流烟道中灰粒对管子的磨损，近年来选用了较低的烟气流速。

煤的灰分中某些矿物质会造成炉膛及对流管束的结渣、堵灰，尤其是煤中的含钠量对灰分的熔化凝聚性有很大影响，含钠量越高，灰分的熔化凝聚性越强，这样就使炉膛及对流受热面上的积灰很难清除。为解决这一个问题，设计上采取一系列措施，其中包括：

(1) 加大炉膛下部尺寸，以降低燃烧器区域的最大热流量。

(2) 维持足够的炉膛受热面使炉膛出口烟气温度降低。

(3) 加大各旋流燃烧器间的间距，加大燃烧器与炉墙及灰斗的间距，以降低炉墙的热流量，减少 NO_x 的生成。

(4) 采用“灰斗下通空气”及“空气屏幕”的方法，使在灰斗倾斜槽及封闭炉墙等处易结渣的地方形成一层由燃烧空气形成的防护层，从而产生氧化气氛，防止结渣及堵灰。

(5) 采用蒸汽吹灰，在蒸汽吹灰不足以解决问题的地方用水力吹灰防止积灰，保持受热面清洁。

(6) 加大管子的横向间距，炉膛出口处的立式管屏最易积灰，其管屏横向节距最小应为 91cm ，而管子之间则基本为相切。锅炉后部烟道采用光管，管子横向节距不得小于 18cm ，管子之间距离为 $10\sim 13\text{cm}$ 。

第三节 典型电站锅炉

一、600MW 亚临界压力自然循环锅炉

某电厂 2 号炉为加拿大 Babcock & Wilcox 公司设计制造的亚临界压力、一次中间再热、自然循环、单汽包、尾部平行分流、倒 U 形半露天布置锅炉，采用平衡通风，前后墙对冲燃烧技术，600MW 自然循环锅炉总体布置如图 1-2 所示。锅炉特点如下：

(1) 属于 B&W 公司 RBC (radiant boiler carolina) 自然循环锅炉系列。辐射型高温过热器，对流再热器，尾部烟道布置低温再热器、低温过热器和省煤器，其后设再热汽温调节的烟气偏流挡板。

(2) 具有良好的调峰能力，可满足周期性负荷，两班制运行需要。在水动力方面，RBC 锅炉拥有 12 头内螺纹管技术，可最大限度地提高循环可靠性。

设有 RBC 锅炉旁路系统以适应 $50\%\sim 100\%$ 变工况周期运行及调峰要求。该系统由四个子系统组成，可实现三种功能：

1) 汽包压力控制——过热器旁路。

2) 再热器出口温度控制——再热器蒸汽减温器。

3) 主汽温控制并实行双压运行——过热器蒸汽减温器加二级过热器切断阀旁路调节阀。

为提高本体结构承受周期疲劳应力的能力，采取了特殊严格的结构措施应用 B&W 公司核容器低周疲劳分析成果，确定厚壁汽包在各种运行工况的安全限制，还提高了燃烧系统的适应性。

(3) B&W 的 RBC 锅炉燃烧技术具有鲜明传统风格，采用旋流燃烧器前后墙对冲燃烧