



中国电力企业联合会审定

全国电力继续教育规划教材

锅炉设备及其系统

杨宏民 石晓峰 主 编
侯俊凤 副主编



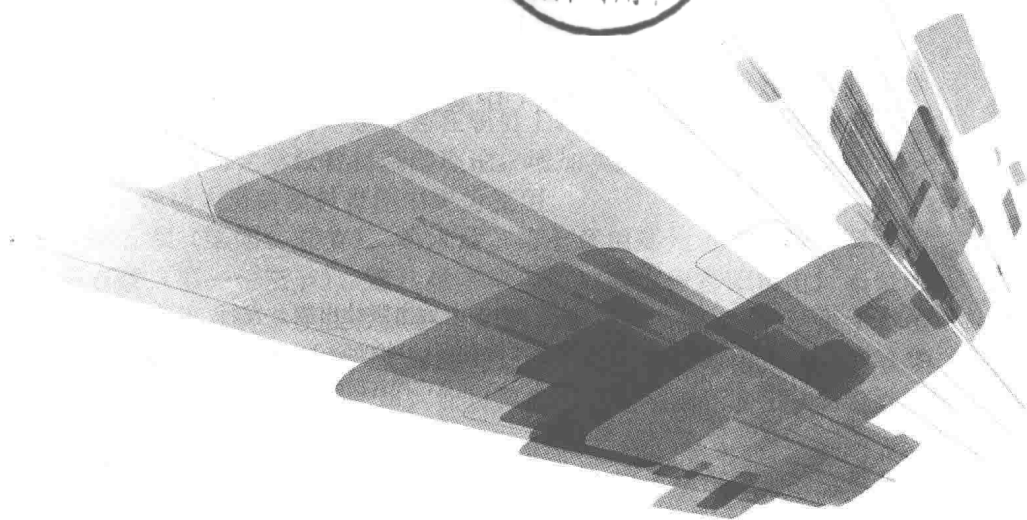
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力继续教育规划教材

锅炉设备及其系统

主 编 杨宏民 石晓峰
副主编 侯俊凤
参 编 李 刚 李朝波
梁 晔 张灵凤
主 审 王金枝



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力继续教育规划教材。

本书主要介绍我国超(超)临界锅炉设备及系统,内容包括燃料及其燃烧计算、锅炉热平衡、煤粉制备及系统、燃烧原理及设备、超临界锅炉水冷壁及汽水工况、过热器与再热器、省煤器和空气预热器、超临界锅炉的风烟系统、超临界锅炉的启动系统、超临界锅炉启动与停运、锅炉机组的运行调整及锅炉常见故障及处理等。

本书可作为电力技术类在校大中专学生专业知识拓展课程用教材及参考书,也可作为超临界机组锅炉运行、检修人员的培训及继续教育用教材,并可供从事超临界火力发电机组运行、检修等相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉设备及其系统/杨宏民,石晓峰主编. —北京:中国电力出版社,2014.8

全国电力继续教育规划教材

ISBN 978-7-5123-6104-1

I. ①锅… II. ①杨… ②石… III. ①超临界压力锅炉—继续教育—教材 IV. ①K229.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 139817 号



中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

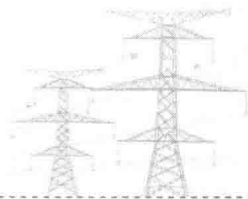
787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 533 千字

定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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



前言

为了满足发电行业对高技术技能型人才的需求,在中国电力企业联合会指导下,我们编写了电力继续教育规划教材《锅炉设备及其系统》。本教材由校企合作组成编写组,高校编者2人,生产企业编者5人,内容充分考虑现场人员普遍关心、关注的问题,从安全、节能、环保角度出发,以理论和实践密切结合方式,本着贴近生产、实用原则,全面系统地介绍了超(超)临界锅炉的原理、设备、运行及事故处理等方面的内容。

教材突出了现场实际操作技能及技术应用,对本专业必备的基础知识和相关知识做了简单介绍,重点关注超(超)临界锅炉技术领域的新知识、新技术、新设备、新工艺。教材内容特色有:锅炉原理及计算以实用为主,例如燃料及计算部分主要从节能、环保出发,强调氧量、负压、漏风的控制,还安排了现场配煤混烧等内容;燃烧原理及设备主要强调稳燃、燃尽、结渣及环保等问题;锅炉设备及系统均按目前最先进的在运600MW及1000MW机组超临界锅炉设备进行内容安排,对常见系统及问题进行了介绍,例如制粉系统、启动系统、风烟系统等;锅炉运行调整及事故处理内容主要强调对操作步骤原理的理解,以求发电企业运行人员技术应用水平的全面提升。

教材适用于发电企业专业技术人员拓展专业知识、提升专业素质,同时可作为在校或新入职大学毕业生课外读物和上岗前培训教材,也可为在职员工转岗、轮岗适应性培训提供服务。由于本教材要求内容起点高,简化学校教材基础理论,增加实践内容,作为对就业3~5年中专毕业生教育学习及现场人员继续教育用书更为实用。

本书共分为十三章,第五章(第四、五节)、第六章、第七章由郑州电力高等专科学校杨宏民编写,第一章、第五章(第一~三节)、第八章(第三节)由大唐首阳山电厂石晓峰编写,第二~四章由郑州电力高等专科学校侯俊凤编写,第八章(第一、二节)、第十章由大唐龙岗电厂李刚编写,第九章由大唐龙岗电厂梁晔编写,第十一、十二章由大唐三门峡华阳电厂李朝波编写,第十三章由大唐三门峡华阳电厂张灵凤编写。本书由杨宏民、石晓峰担任主编,杨宏民负责全书的统稿工作。

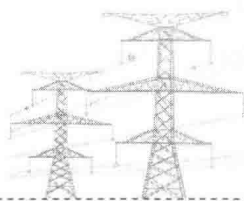
本书主审国网技术学院王金枝教授对书稿进行了认真审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此谨表示诚挚的谢意。

本书在编写过程中,参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及有关兄弟院校和企业的技术资料、说明书、图纸等,并得到了相关院校老师和企业同行的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2014年2月



目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 超临界锅炉与直流锅炉	1
第二节 超临界锅炉的特点	5
第三节 超临界锅炉技术的发展	10
第四节 典型超临界锅炉介绍	12
第二章 燃料及其燃烧计算	25
第一节 燃料煤	25
第二节 氧量及过量空气系数	36
第三节 烟气分析及烟气量的计算	41
第四节 锅炉的燃料油	46
第三章 锅炉热平衡	49
第一节 正平衡求热效率	49
第二节 反平衡求效率及各项热损失	51
第三节 锅炉热平衡试验方法	57
第四节 影响锅炉热效率的因素分析	60
第四章 煤粉制备及系统	63
第一节 基础知识	63
第二节 磨煤机	68
第三节 制粉系统及设备	86
第四节 制粉系统运行及调整	97
第五章 燃烧原理及设备	106
第一节 燃烧基础知识	106
第二节 煤粉气流的燃烧	109
第三节 炉膛及点火装置	115
第四节 煤粉燃烧器	123
第五节 我国超临界锅炉常用燃烧设备及特点	135
第六章 超临界锅炉水冷壁及汽水工况	149
第一节 直流锅炉的水动力特性及传热恶化	149
第二节 超临界锅炉水冷壁	155

第三节 超临界锅炉的汽水工况	172
第七章 过热器与再热器	180
第一节 过热器与再热器的特点	180
第二节 热偏差	192
第三节 汽温调节	196
第四节 受热面积灰、高温腐蚀及高温氧化	206
第八章 省煤器和空气预热器	210
第一节 省煤器	210
第二节 空气预热器	214
第三节 尾部受热面的积灰、磨损和低温腐蚀	227
第九章 超临界锅炉的风烟系统	234
第一节 风烟系统	234
第二节 风机的原理与调节	236
第三节 风机的非稳定工况	240
第四节 典型风机介绍	245
第十章 超临界锅炉的启动系统	253
第一节 概述	253
第二节 无循环泵的启动系统	255
第三节 带循环泵的启动系统	260
第四节 汽轮机启动旁路系统	276
第十一章 超临界锅炉启动与停运	279
第一节 概述	279
第二节 超临界锅炉的启动	284
第三节 超临界直流锅炉温态、热态、极热态启动	296
第四节 超临界锅炉停运及保护	299
第十二章 锅炉机组的运行调整	304
第一节 锅炉运行调整的任务	304
第二节 直流锅炉的运行特性	305
第三节 超临界锅炉运行调节	311
第十三章 锅炉常见故障及处理	324
第一节 受热面损坏与超温	324
第二节 锅炉灭火与烟道燃烧	334
第三节 锅炉重要辅机故障处理	338
参考文献	341

第一章 概 述

电站锅炉是火力发电厂中实现能量转换的设备。其作用是使燃料在炉内燃烧放热，并将锅炉内工质由水加热成具有足够数量和一定质量（汽压、汽温）的过热蒸汽，供汽轮机使用。锅炉的工作好坏对整个火力发电厂的安全和经济运行影响极大。

随着火力发电机组向大容量方向的发展，超临界压力锅炉的使用越来越普遍，尤其是在一次能源比较缺乏的发达国家和地区。目前，我国超临界机组也已成为主力机组。本章主要论述了超临界锅炉的原理、特点，简单说明了超临界锅炉技术的发展，对我国国产典型超临界锅炉进行了介绍。

第一节 超临界锅炉与直流锅炉

一、超临界锅炉

1. 水的临界状态

火力发电厂的工质是水，在常规条件下水经加热温度达到给定压力下的饱和温度时，将产生相变，水开始从液态变成气态，出现一个饱和水和饱和蒸汽两相共存的区域。当蒸汽压力达到 22.115MPa 时，汽化潜热等于零，汽水密度差也等于零，该压力称为临界压力。低于临界点压力时，从低温下的水加热到过热蒸汽的过程中要经过汽化过程，即经过水和水蒸气共存的状态；而如果压力在临界压力或临界压力以上时，水在加热的过程中就没有汽水共存状态而直接从水转变为蒸汽。水在该压力下加热至 374.15℃ 时即被全部汽化，该温度称为临界温度。

理论上认为，在水的状态参数达到临界点时（22.115MPa，374.15℃），饱和水瞬间就可以完成向饱和蒸汽的转化，水的汽相和液相之间的性质无差别。即在临界点时饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽水共存的两相区存在，二者的参数不再有区别。可以这样理解，压力越高，水蒸气分子间的距离和液体水分子间的距离的差距越小，从而使得水和水蒸气之间的物性差别随着压力升高越来越小，直至达到临界压力时，水和水蒸气没有差别，在同一温度下，要么全部是水，要么全部为汽。

水和汽之间的区别仅在于分子间距离，分子间距离在一定距离范围内就称为水，分子间距离超过这个界限就称为汽。临界或超临界压力下，温度较低时，水分子之间的距离紧密，处于液态水的状态。随着温度的升高，分子动能增大，分子间距离逐渐变大，宏观上看就是水的体积膨胀，或比体积增大。当达到临界温度时，分子之间的距离大于液体水分子之间距离的上限，则水在这瞬间就全部由水变成了蒸汽，之后的加热过程中，水蒸气温度升高，分子间距离继续增大，宏观上水蒸气体积膨胀，比体积变大。

2. 超临界锅炉与直流锅炉

按照主蒸汽压力，电站锅炉可分为高压锅炉 6~10MPa（常见 9.8MPa）、超高压锅炉

10~14MPa (常见 13.7MPa)、亚临界锅炉 14~22.1MPa (常见 16.7、18.3MPa), 超临界锅炉大于 22.1MPa。

习惯上又将超临界机组分为两个层次: ①常规超临界参数机组, 其主蒸汽压力一般为 24MPa 左右, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 540~570℃; ②高效超临界机组, 通常也称为超超临界机组或高参数超临界机组, 其主蒸汽压力为 25~35MPa 及以上, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 580℃ 及以上。理论和实践证明常规超临界机组的效率可比亚临界机组高 2% 左右, 而对于高效超临界机组, 其效率可比常规超临界机组再提高 4% 左右。

由于在临界参数下汽水密度相等, 因此在超(超)临界压力下无法维持自然循环, 即不能采用汽包锅炉, 直流锅炉成为唯一形式, 即超(超)临界锅炉一定是直流锅炉。

直流锅炉以有无汽包分类, 可以适用于任何压力等级, 因此直流锅炉不一定是超临界锅炉, 可以是亚临界或以下压力锅炉, 但如果压力太低, 则不如自然循环锅炉经济和安全, 所以一般应用在压力不低于 16MPa 的锅炉上。

超临界压力下水变成蒸汽不再存在汽水两相区, 由此可知, 超(超)临界压力直流锅炉由水变成过热蒸汽经历了两个阶段, 即加热和过热, 而工质状态由水逐渐变成过热蒸汽。亚临界压力直流锅炉由水变成过热蒸汽要经历加热、蒸发和过热三个阶段。

二、直流锅炉

1. 直流锅炉的工作原理

直流锅炉没有汽包, 整个锅炉由许多管子并联且并用集箱而成。给水在给水泵压头的推动下, 依次流过省煤器、水冷壁、过热器受热面, 完成水加热、汽化和蒸汽过热过程, 循环

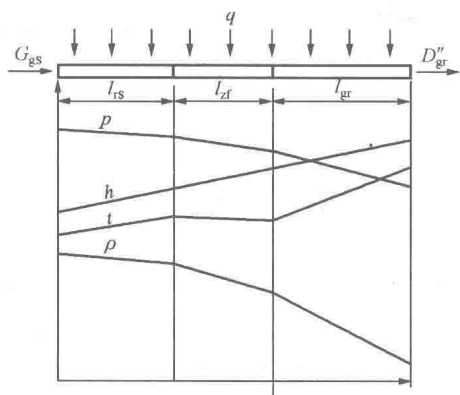


图 1-1 直流锅炉工作原理

倍率 $K=1$ 。图 1-1 示出了其工作原理。图中受热管均匀吸热, q 为热负荷, G_{gs} 为给水流量, D'_{gr} 为出口蒸汽流量, 各曲线表示了沿受热管子长度工质参数的变化过程。在加热水的热水段 l_{hs} 中, 水温 t 与焓 h 逐步升高, 压力 p 因流动阻力而有所下降, 密度 ρ 也略有下降; 在蒸发段 l_{zf} 中, 水逐渐变成蒸汽, 压力降低较快, 密度也有较大的减小, 蒸发段中的工质温度为饱和温度, 随着压力下降而下降, 但工质焓 h 不断上升; 在过热段 l_{gr} 中, 蒸汽的温度与焓都不断上升, 压力和密度都不断下降。

2. 质量含汽率 x 和循环倍率 K

(1) 质量含汽率 x : 汽水混合物中, 蒸汽的质量流量与汽水混合物的总质量流量之比。可表示为

$$x = D/G \quad (1-1)$$

(2) 循环倍率 K : 指进入上升管的循环水流量 G 与上升管出口的蒸汽流量 D 之比值。可表示为

$$K = G/D \quad (1-2)$$

由于 $x=D/G$, 故 K 又可表示为

$$K = 1/x \quad (1-3)$$

直流锅炉的循环倍率等于 1, 水冷壁出口蒸汽干度为 1, 进入水冷壁的水到出口全部转

变为蒸汽；亚临界压力汽包锅炉水冷壁出口蒸汽干度为 0.16~0.25，循环倍率为 4~6；超高压汽包锅炉水冷壁出口蒸汽干度为 0.13~0.20，循环倍率为 5~8。同容量的锅炉，循环倍率越小进入水冷壁流量越少，直流锅炉流量最小，因此直流锅炉水冷壁更容易出现安全问题。

3. 直流锅炉的基本形式

直流锅炉的类型主要由水冷壁的结构形式和其系统的不同来区分。直流锅炉的水冷壁管由于布置自由，故其形式很多。

图 1-2 为传统的直流锅炉水冷壁的基本形式，即水平围绕管圈型（拉姆辛型）、垂直多管屏型（本生型）和回带管圈型（苏尔寿型）。

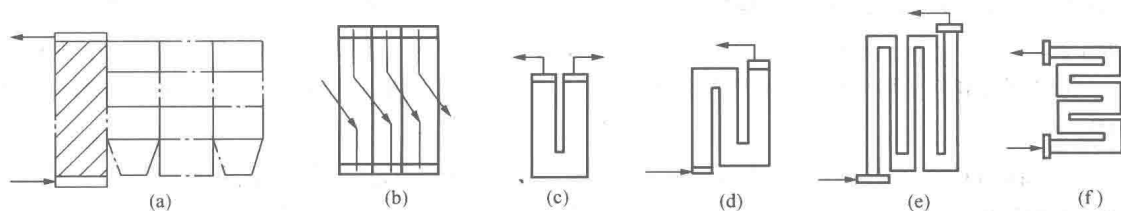


图 1-2 传统的直流锅炉水冷壁的基本形式

(a) 水平围绕管圈型；(b) 垂直多管屏型；

(c)~(f) 回带管圈型

水平围绕管圈型是由多根平行管子组成管带，沿炉膛四周围绕上升，三面水平、一面倾斜。

垂直多管屏型是在炉膛四周布置多个垂直管屏，管屏之间由炉外管子连接，整台锅炉的水冷壁管可串联成一组或几组，工质顺序流过一组内的各管屏，组与组之间并联连接。

回带管圈型的水冷壁是由多行程迂回管带形成。管带迂回方式分为上下迂回和水平迂回两种。

现代直流锅炉的水冷壁形式有很大的发展，主要有螺旋管圈型和垂直管屏型两类。螺旋管圈型水冷壁是在水平围绕管圈型的基础上发展而成，垂直管屏型是在垂直多管屏型的基础上发展而成。

螺旋管圈型水冷壁是 20 世纪 70 年代以来发展较快的一种类型，见图 1-3。水冷壁管组成管带，沿炉膛周界倾斜螺旋上升，没有水平围绕管圈型中的水平段，管带中的并联管数也增多了。螺旋管圈型水冷壁适用于滑压运行，能适用超临界和亚临界压力，平行管热偏差小，燃料适应性广泛，还可采用整体焊接膜式水冷壁。它的缺点是水冷壁支吊结构较复杂，制造、安装工艺要求高。

4. 直流锅炉的技术特点

(1) 直流锅炉不用汽包。直流锅炉水冷壁出口工质质量含汽率 $x''=1$ ，不需要汽水分离，蒸汽直接进入过热器，水冷壁的进水全部来自省煤器，故不用汽包，从而具有以下特点：

- 1) 锅炉给水品质要求高，要求凝结水进行 100% 的除盐处理。
- 2) 锅炉蓄热量小，运行参数稳定性较差，但在启动和停运过程中无

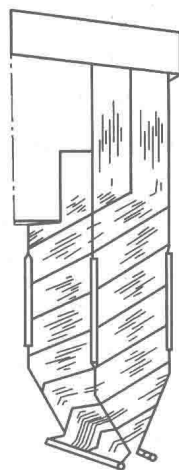


图 1-3 螺旋管圈型水冷壁

汽包热应力限制,可提高启动和停运速度;启停速度和变负荷速度受过热器出口集箱的热应力及汽轮机热应力和胀差的限制。

3) 锅炉本体金属消耗量最少,锅炉质量轻。一台 300MW 自然循环锅炉的金属质量为 5500~7200t,相同等级直流锅炉的金属质量仅有 4500~5680t,一台直流锅炉大约可节省金属 2000t。加上省去了汽包的制造工艺,使锅炉制造成本降低。

4) 直流锅炉在结构上虽然有省煤器、水冷壁和过热器,但在运行工况下,水、汽水混合物、过热蒸汽的分界点在受热面上的位置随工况不同而变化,从而使其运行特性和汽包锅炉有明显的差别。

(2) 水冷壁的流动阻力全部要靠给水泵来克服,这部分阻力占全部阻力的 25%~30%,600MW 以上的直流锅炉的流动阻力一般为 5.4~6.0MPa,因此直流锅炉给水泵压头比汽包锅炉的高,既提高了制造成本,又增加了给水泵电耗。但直流锅炉可不受工质压力的限制,目前汽包锅炉的工质压力最高达到亚临界压力,而直流锅炉对超临界压力或亚临界压力都适用。

(3) 直流锅炉水冷壁允许有较大的压力降,由于给水泵能提供较高的压头,因此直流锅炉的水冷壁允许有较大的流动阻力,可选用较小直径的水冷壁管,从而具有以下特点:

1) 水冷壁在炉膛内的布置有较多的自由度,可采用螺旋管圈或垂直管屏水冷壁,采用螺旋管圈水冷壁有利于实现变压运行。

2) 采用小管径水冷壁,可以达到较高的质量流速,提高了传热能力,为水冷壁的安全工作创造了条件,同时节省了金属,减轻了炉墙质量,但减小了锅炉的热惯性。

3) 水冷壁的金属储热量和工质储热量最小,即热惯性最小,使快速启停的能力进一步提高,适用机组调峰的要求。但热惯性小也会带来问题,它使水冷壁对热偏差的敏感性增强。当煤质变化或炉内火焰偏斜时,各管屏的热偏差增大,由此引起各管屏出口工质参数产生较大偏差,进而导致工质流动不稳定或管子超温。

(4) 直流锅炉启动时约有 30% 额定流量的工质经过水冷壁并被加热,为了回收启动过程中的工质和热量,并保证低负荷运行时水冷壁管内有足够的质量流速,直流锅炉需要设置专门的启动系统,而且需要设置过热器的高压旁路系统和再热器的低压旁路系统。加上直流锅炉的参数较高,需要的金属材料档次相应要提高,其总成本不低于自然循环锅炉。

(5) 直流锅炉启动系统中的汽水分离器在低负荷时起汽水分离作用并维持一定的水位,在高负荷时切换为纯直流运行,汽水分离器作为通流承压部件。因此直流锅炉在低负荷时有汽包锅炉的一些特性。

(6) 汽温调节的主要方式是调节燃料量与给水量之比,辅助手段是喷水减温或烟气侧调节。由于没有固定的汽水分界面,随着给水流量和燃料量的变化,受热面的加热段、蒸发段和过热段长度发生变化,汽温随之发生变化,汽温调节比较困难。

(7) 变压运行的超临界参数直流锅炉在亚临界压力范围和超临界压力范围内工作时,都存在工质的热膨胀现象,并且在亚临界压力范围内可能出现膜态沸腾,在超临界压力范围内可能出现类膜态沸腾。低负荷运行时,给水流量和压力降低,受热面入口的工质欠焓增大,容易发生水动力不稳定。由于给水流量降低,水冷壁流量分配不均匀性增大。

(8) 自动化程度高,控制系统复杂,调节装置的费用较高。

第二节 超临界锅炉的特点

一、我国超临界锅炉的设备特点

1. 锅炉整体布置形式

(1) Π 型布置。 Π 型布置是传统普遍采用的方式,烟气由炉膛经水平烟道进入尾部烟道,在尾部烟道通过各受热面后排出。其主要优点是锅炉高度较低,尾部烟道烟气向下流动有自生吹灰作用,各受热面易于布置成逆流形式,对传热有利等。其主要缺点是烟气流经水平烟道和转弯烟室,引起灰分的浓缩集中,使尾部受热面的局部磨损加重;燃烧器布置较困难,烟气分布的不均匀性较大;水平烟道中的受热面垂直布置不能疏水;炉膛前后墙结构差别大,后墙水冷壁的布置较复杂等。我国电站锅炉普遍采用这种布置方式。

(2) 塔式布置。塔式布置是将所有承压对流受热面布置在炉膛上部,烟气一路向上流经所有受热面后再折向后部烟道,流经空气预热器后排出。这种布置方式的最大优点是烟气温度的均匀性,对流受热面的磨损较轻,对流受热面水平布置易于疏水,水冷壁布置较方便,穿墙管大大减少等,因而在大型锅炉中采用更为优越,在欧洲得到广泛的采用,积累了丰富的经验。我国上海锅炉厂采用这种布置形式较多。

2. 水冷壁结构形式

(1) 螺旋管圈水冷壁。螺旋管圈水冷壁是首先应用于超临界变压运行锅炉的水冷壁形式。这是在炉膛的下部及中部,即炉膛的高热负荷区,用螺旋盘绕的方式形成膜式水冷壁,到炉膛上部再通过中间混合集箱或分叉管过渡到垂直管水冷壁。螺旋管圈(内螺纹管)的主要优点是可以自由地选择管子的尺寸和数量,因而能选择较大的管径和较高的质量流速,管圈中每根管子能同样地绕过炉膛的各个壁面,因而每根管子的吸热量相同,管间的热偏差最小。由于这些优点使这种结构形式能安全地用于变压运行,并得到广泛的应用,至今仍是超临界锅炉水冷壁的主要结构形式。其缺点是螺旋管圈的制造安装、支承等工艺较为复杂,流动阻力较大。

(2) 垂直水冷壁型式。为了克服螺旋管圈的缺点,开发了采用内螺纹管的垂直水冷壁型式,由于垂直管圈的质量流速受到炉膛周界的限制,不能自由选择,因此只能适用于 600MW 以上的大型机组,应用内螺纹管来防止传热恶化的发生,以允许较低的质量流速。由于炉膛热负荷分布不均匀,在水冷壁进口采用成组节流圈来补偿管子的吸热偏差,同时,在后烟道中布置部分对流蒸发器,降低水冷壁出口的温度水平,以减小炉膛水冷壁在变压运行时的温度偏差。垂直管水冷壁结构简单,支承方便;安装焊口少,可靠性增加;水冷壁落渣容易,使水冷壁的结渣减少;管内流速降低,压力损失减小;受热部分压力损失占水冷壁总损失的份额减小,由热负荷变化引起的流量变化小。由于具有这些优点,在今后将会有更多的发展。哈尔滨锅炉厂 1000MW 超超临界锅炉即采用这种方式。

3. 燃烧方式

直流燃烧器四角切圆燃烧和旋流燃烧器前后墙对冲燃烧是目前国内外应用最为广泛的煤粉燃烧方式。由于切圆燃烧中四角火焰的相互支持,一、二次风的混合便于控制等特点,其煤种适应性更强,我国制造的国产引进型 300、600MW 亚临界压力机组绝大多数采用这种燃烧方式,上海锅炉厂超临界锅炉也采用这种燃烧方式。切圆燃烧方式存在的主要问题是残

余旋转加大,从而会造成炉膛出口以后受热面的热偏差增大。一般认为,Π型布置锅炉随着容量的增大,残余旋转导致的烟气侧热力偏差会加剧,采用八角双切圆燃烧方式更合适,哈尔滨锅炉厂1000MW超超临界锅炉即采用这种方式。

对冲燃烧方式则具有锅炉沿炉膛宽度的烟温及速度分布较均匀,过热器与再热器的烟温和汽温偏差相对较小的特点。随着锅炉容量的增加,一般只需调整炉膛宽度来增加炉膛断面,可以方便地增加一定数量的燃烧器,保证炉内火焰有较好的充满情况,保证均衡的燃烧热负荷。东方锅炉厂和哈尔滨锅炉厂引进型600MW超临界锅炉主要采用这种燃烧方式,东方锅炉厂1000MW超超临界锅炉也采用这种方式。

近几年,“W”型火焰燃烧方式的超临界锅炉在我国也有较多使用,其特点为炉膛温度高,燃尽时间长,对燃烧低挥发分的无烟煤有较强的适应能力。

4. 采用低氮燃烧技术

(1) 采用浓淡型煤粉燃烧器。浓淡偏差燃烧是基于过量空气系数对 NO_x 的变化关系,使部分燃料在空气不足的条件下燃烧,即燃料过浓燃烧;另一部分在空气过剩的条件下燃烧,即燃料过淡燃烧。无论是过浓燃烧或过淡燃烧,燃烧时过量空气系数都不等于1,燃料先经历一个燃料过浓或过稀的燃烧过程,使两个火焰分别处于过量空气系数远大于1或远小于1。燃料过浓部分,因氧气不足,燃烧温度也不高,所以燃料 NO_x 和热力 NO_x 都不高;燃料过淡部分,因空气量很大,燃烧温度降低,使热力 NO_x 降低。

(2) 采用分级燃烧技术。燃烧室中的分级燃烧方法是,在主燃烧器上部装设燃尽风喷口,在燃烧室内沿高度分成三个区域,即主燃区、 NO_x 还原区和燃尽区。在主燃区的上方设置一段还原区。由于还原区内氧浓度较低,有利于进一步分解主燃区中生成的 NO_x 的浓度。还原区的上方为燃尽区,在该区,燃烧所要求的一部分空气由燃尽风喷嘴喷入炉内,使未燃尽的焦炭进一步燃烧,达到风煤燃烧平衡。此时,由于煤燃烧产生的烟气中的一部分 NO_x 已还原成 N_2 ,再加入空气对 NO_x 生成量的影响不大,从而实现低 NO_x 燃烧的目的。

目前我国超临界锅炉均采用了上述方法来减少 NO_x 的生成。

5. 采用直吹式制粉系统

制粉系统一般为冷一次风正压直吹式制粉系统,每台炉配6台磨煤机,BMCR工况下5台运行、1台备用,配备6台与之相适应的电子称重式给煤机,并采用三分仓回转式空气预热器。常用磨煤机有双进双出钢球磨煤机、碗式中速磨煤机、MPS磨煤机等。

6. 汽温调节

过热器采用水/煤比作为主要汽温调节手段,并配合二级喷水减温作为主汽温度的细调节,喷水减温每级左、右两点布置,以消除各级过热器的左右吸热和汽温偏差。再热器调温以烟气挡板调温为主,必要时可采用事故喷水辅助调整。

7. 给水系统

我国超临界机组一般配置 $2 \times 50\%$ BMCR汽动调速给水泵和1台 30% BMCR电动调速给水泵,并配置有主给水管道和低负荷旁路给水管道,在低负荷给水管道上设置有调节阀。在机组启动初期,有电动给水泵和调节阀共同维持给水量,当机组负荷约25%时第一台汽动给水泵投入运行,处于电动给水泵与汽动给水泵并列运行状态。负荷再增大后第二台汽动给水泵启动,两台汽动给水泵都运行后,电动给水泵手动减速并停运。

8. 锅炉启动系统

我国超临界锅炉均采用内置式分离器启动系统，分为带启动循环泵和不带启动循环泵的简化启动系统两种形式。

二、国产超临界锅炉的参数及技术性能要求

(一) 锅炉参数

1. 锅炉容量

(1) 锅炉最大连续出力工况——boiler maximum continue rate (BMCR)，锅炉最大连续蒸发量，指锅炉在额定蒸汽参数、额定给水温度，并使用设计燃料、安全连续运行时能达到的最大蒸发量，也称为锅炉最大连续蒸发量。在设计热力计算中输入该值，确定锅炉各受热面、含管子规格、材料、热力参数等。锅炉的实际最大蒸发量大于合同要求的蒸发量，一般锅炉制造厂家都留有一定裕度。锅炉 BMCR 对应于汽轮机 VWO (valve wide open) 即汽轮机调节阀全开工况。

(2) 锅炉额定节能出力工况——economize continue rate (ECR)，指锅炉在额定蒸汽(包括再热器进口蒸汽)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，也称为锅炉节能下连续蒸发量工况，通常为锅炉考核工况。对于调试单位和性能试验单位更关注的是 ECR，它是考核锅炉设计、制造、调试、安装、辅机设备等水平的重要工况。锅炉 ECR 对应于汽轮机 THA (turbine heat acceptance) 即汽轮机性能验收工况，或称汽轮机热耗验收工况。

(3) 锅炉额定出力工况——boiler rated load (BRL)，指汽轮机在夏季高背压、补水率 3%，锅炉为保证机组带额定电功率下的工况，也称为锅炉额定蒸发量工况。此时锅炉蒸发量大于 ECR 的蒸发量，BMCR 的锅炉热效率允许低于 BRL 的。BRL 工况应处于锅炉热效率最高的负荷区内，通常也是锅炉热效率保证工况。锅炉 BRL 对应于汽轮机的 TRL (turbine rated load) 即汽轮机额定出力工况，或汽轮机铭牌保证工况。

2. 锅炉蒸汽参数

锅炉蒸汽参数通常是指锅炉过热器、再热器出口处的蒸汽压力和温度。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℃。我国常见的超(超)临界锅炉参数有 25.4MPa/571℃/569℃和 26.25MPa/605℃/603℃。

3. 锅炉给水温度

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

锅炉的主蒸汽和再热蒸汽的压力、温度、流量等要求与汽轮机的参数相匹配。同一容量超临界机组，根据所配汽轮机不同，锅炉参数也会有所不同。表 1-1 为我国某国产超临界及超超临界锅炉的主要参数。

表 1-1 我国某国产超临界及超超临界锅炉主要参数

机组容量	单位	600MW		1000MW	
项目		BMCR	BRL	BMCR	BRL
锅炉蒸发量	t/h	1900	1807.9	3110	2943.67
过热器出口蒸汽压力	MPa (a)	25.4	25.3	26.25	26.12

续表

机组容量	单位	600MW		1000MW	
项目		BMCR	BRL	BMCR	BRL
过热器出口蒸汽温度	℃	571	571	605	605
再热蒸汽流量	t/h	1607.6	1525.5	2465.6	2326.9
再热器进口蒸汽压力	MPa (a)	4.71	4.47	5.55	5.24
再热器出口蒸汽压力	MPa (a)	4.52	4.29	5.35	5.06
再热器进口蒸汽温度	℃	322	316	360	353
再热器出口蒸汽温度	℃	569	569	603	603
省煤器进口给水温度	℃	284	280	302	298

注 压力单位中“a”表示绝对压力。

(二) 锅炉技术性能要求

本节以 1000MW 机组锅炉为例进行介绍。

1. 技术经济指标

锅炉在投入商业运行后，年利用小时数不少于 6500h，年可用小时数不少于 7800h。

锅炉投产第一年强迫停运率不大于 2%，计算公式如下：

$$\text{锅炉强迫停运率} = \frac{\text{锅炉强迫停运小时数}}{\text{锅炉强迫停运小时数} + \text{运行小时数}} \times 100\%$$

锅炉运行小时数见表 1-2。

表 1-2 锅炉运行小时数

负荷 (%)	每年小时数 (h)
100	4200
75	2120
50	1180
40	300

2. 锅炉本体性能要求

(1) 锅炉带基本负荷并参与调峰。锅炉变压运行，采用定一滑一定运行方式。锅炉负荷变化率应达到下述要求：

- 1) 在 50%~100%BMCR 时，为±5%BMCR/min；
- 2) 在 30%~50%BMCR 时，为±3%BMCR/min；
- 3) 在 30%BMCR 以下时，为±2%BMCR/min。

负荷阶跃：大于 10%汽轮机额定功率/min。

(2) 锅炉满足在全部高压加热器停运时，蒸汽参数保持在额定值，蒸发量满足汽轮机带额定功率。此时过热器、再热器不超温。

(3) 燃用设计煤种和两种校核煤种时，过热汽温在 35%~100%BMCR、再热汽温在 50%~100%BMCR 负荷范围时，过热器和再热器温度能保持稳定在额定值，偏差不超过±5℃。

(4) 锅炉在燃用设计煤种时，不投油最低稳燃负荷不大于锅炉的 35%BMCR，并在最低稳燃负荷及以上范围内满足自动化投入率 100%的要求。

(5) 锅炉燃烧室的设计承压能力超过±5800Pa，当燃烧室突然灭火内爆或送风机全部跳闸，瞬时不变形承载能力为±9800Pa。

(6) 锅炉从点火到带满负荷所需时间为：

- 1) 冷态启动：7~8h。
- 2) 温态启动：2~3h。
- 3) 热态启动：1~1.5h。
- 4) 极热态启动：<1h。

3. 锅炉寿命及要求

锅炉各主要承压部件的使用寿命大于 30 年，受烟气磨损的低温对流受热面的使用寿命应达到 100 000h，空气预热器的冷段蓄热组件的使用寿命不低于 50 000h，燃烧器防磨件等使用寿命应大于 50 000h，省煤器及其防磨板的使用寿命应不少于 100 000h，喷水减温器的喷嘴使用寿命应大于 80 000h。

锅炉机组在 30 年的寿命期间，允许的启停次数规定如下：

- (1) 冷态启动（停机超过 72h）：>200 次。
- (2) 温态启动（停机 72h 内）：>1200 次。
- (3) 热态启动（停机 10h 内）：>5000 次。
- (4) 极热态启动（停机小于 1h）：>400 次。
- (5) 负荷阶跃：>12000 次。

4. 锅炉热力特性

锅炉热力特性见表 1-3。

表 1-3 锅 炉 热 力 特 性

项目	单位	BMCR	BRL	THA	75%THA	高压加热器全切
燃料消耗量（实际）	t/h	409.09	391.62	368.77	278.27	370.20
锅炉热损失						
干烟气热损失	%	4.65	4.60	4.59	4.44	3.70
氢燃烧生成水热损失	%	0.22	0.22	0.22	0.20	0.18
燃料中水分引起的热损失	%	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06
空气中水分热损失	%	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04
未燃尽碳热损失	%	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
辐射及对流散热损失	%	0.17	0.17	0.17	0.25	0.21
未计入热损失	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总热损失	%	6.97	6.92	6.91	6.81	5.99
锅炉热效率						
计算热效率（按 ASME PTC4.1 计算，高位发热值）	%	89.98	90.03	90.04	90.14	90.93
计算热效率（按低位发热量计算）	%	93.03	93.08	93.09	93.19	94.01
制造厂裕度	%		0.08			
保证热效率	%		93.00			

三、超临界直流锅炉复合变压运行中的问题

现代超临界机组采用复合变压运行方式，即在高负荷时保持额定的蒸汽压力，在低负荷时保持最低允许的供汽压力，在中间负荷时采用变压运行。也即在高负荷及低负荷区，负荷调节采用改变汽轮机调节阀开度的方式，而蒸汽压力保持不变；在中间负荷范围，采用变压运行，用改变锅炉主蒸汽压力的方式调节负荷。这种复合变压运行方式可使机组在高负荷运行时保持额定压力，具有最佳的循环效率和良好的负荷调节性能。在中间负荷采用变压运行，可使汽轮机通流部分的容积流量基本不变，保持较高的内效率，并使汽轮机高压缸的蒸汽温度保持稳定，因而热应力较小，具有快速变负荷的能力；在低负荷时定压运行，可防止压力过低出现流动不稳定等问题，因而具有最佳的综合性能。

超临界直流锅炉采用复合变压运行过程中存在的问题如下：

(1) 采用复合变压运行的超临界本生直流锅炉，随着负荷的降低，过热器出口汽压将逐步降低，在更低的负荷时，将在亚临界参数下运行，锅炉各部分（省煤段、蒸发段、过热和再热段）的吸热量和比率都发生着动态变化，特别是蒸发段，每千克的工质要吸收更多的热量，必须注意升降负荷时出现的过烧和欠烧现象的影响。

(2) 随着负荷降低，工作条件极为恶劣的水冷壁中，质量流速也按比例下降。在直流方式下，工质流动的稳定性受到影响，为了防止出现流动多值性、脉动等不稳定现象，必须限定最低直流运行负荷时的质量流速。

(3) 在进入临界压力点以下低负荷运行时，与亚临界机组一样，必须重视水冷壁管内两相流的传热和流动，要防止发生膜态沸腾而导致水冷壁管金属超温爆管。

(4) 由于降低负荷后，省煤器段的吸热量减少，按 MCR 工况设计布置的省煤器在低负荷时有可能出现出口处汽化，它将影响水冷壁流量分配，导致流动工况恶化，故须限制省煤器的吸热量。

(5) 负荷降低后，炉膛水冷壁的吸热不均将加大，必须注意防止因水冷壁管圈吸热不均而导致温度偏差增大。

(6) 在整个变压运行中，蒸发点的变化将使单相和两相区水冷壁金属温度变化，必须注意水冷壁及其刚性梁体系的热膨胀设计，并防止频繁变化而引起承压件上出现疲劳破坏。

(7) 由于压力降低，饱和汽温下降，烟气和蒸汽之间的温差增加，过热器的焓增比定压运行机组要大，又促使汽温进一步升高，故须考虑较大的减温器容量，同时还要保证各种负荷下的喷水量。

第三节 超临界锅炉技术的发展

一、超临界锅炉的发展现状

1. 国外超临界锅炉的发展现状

大型超临界机组自 20 世纪 50 年代在美国和德国开始投入商业运行以来，到今天已大量投运，并取得了良好的运行业绩。近十几年来，发达国家积极开发应用高效超临界参数发电机组。美国（170 多台）和前苏联（200 多台）是超临界机组最多的国家，而发展超超临界技术领先的国家主要是日本、德国和丹麦等。

德国是发展超超临界技术最早的国家之一，在早期追求高参数，但后来蒸汽参数降低并

长期稳定在 25MPa/545℃/545℃的水平上,其后蒸汽参数逐步提高。2003 年投产的参数为 965MW26MPa/580℃/600℃的机组,设计热效率为 44.5%。日本因能源短缺,燃料主要依赖进口,因此采用超临界发电机组(占总装机容量的 60%以上)。1989 年和 1990 年,日本的川越电厂先后投运两台参数为 700MW31MPa/566℃/566℃/566℃的机组。这是日本发展超超临界发电技术的标志性机组。近年来一批百万千瓦级超超临界发电机组相继投入运行,除达到很高的可靠性外,其循环效率可达到 45%左右。丹麦 1998 年投运的参数为 400MW28.5MPa/580℃/580℃/580℃的机组,效率高达 47%;2001 年投运的 AVV2 电厂的一台超超临界机组效率高达 49%,这是目前世界上超超临界机组中运行效率最高的机组。

从各国的发展来看,自 20 世纪 90 年代初开始发展超超临界机组,到 90 年代末期其蒸汽温度基本都提高到了 580~600℃,并且都有相应的电厂成功地投入了商业运行。值得注意的是国外超超临界发电机组大都建在海边,利用低温海水冷却,使机组循环效率进一步提高。

2. 我国超临界锅炉的发展现状

我国从 20 世纪 80 年代后期开始重视发展超临界机组。上海石洞口二厂从美国燃烧工程公司引进的 2 台 600MW (24.2MPa, 538℃/566℃) 超临界机组于 1991 年和 1992 年投入运行。之后,从俄罗斯引进的南京热电厂 2×300MW、营口电厂 2×300MW、天津盘山电厂 2×500MW、内蒙古伊敏电厂 2×500MW、辽宁绥中电厂 2×800MW 的超临界机组陆续投入运行,其参数均为 22.5MPa/540℃/540℃。福建漳州后石电厂由日本三菱公司和美国燃烧工程公司引进的 6 台 600MW (24.2MPa/538℃/566℃) 超临界机组从 1999 年底开始陆续投运。上海外高桥二厂由阿尔斯通公司引进,并由上海锅炉厂承担大部分制造任务的 2 台 900MW (24.95MPa/538℃/566℃) 超临界机组于 2004 年投入运行。由东方锅炉厂采用日本日立公司技术生产的河南沁北电厂 2 台 600MW (24.2MPa/566℃/566℃) 超临界机组已于 2004 年 11 月和 12 月分别投运。由哈尔滨锅炉厂应用三井巴布科克公司技术生产的江苏常熟电厂 2 台 600MW (24.2MPa/538℃/566℃) 超临界机组已于 2005 年 3 月和 6 月分别投入运行。在近十几年中,我国三大锅炉厂通过技术引进和大量的研究工作,已完全掌握了超临界锅炉的制造技术,具备了批量生产超临界锅炉的能力,使我国超临界锅炉机组得到了迅速的推广。在此基础上,我国超超临界机组也开始发展,哈尔滨锅炉厂承担的浙江玉环电厂 4×1000MW (27.56MPa/605℃/603℃) 机组、东方锅炉厂承担的山东邹县电厂 2×1000MW (26.15MPa/605℃/603℃) 机组、上海锅炉厂承担的上海外高桥第三电厂 2×1000MW (27.9MPa/605℃/603℃) 机组也相继投运。目前我国投运的百万千瓦的超超临界机组已达 50 多台,中国已经是世界上 1000MW 超超临界机组发展最快、数量最多、容量最大和性能最先进的国家之一。

通过 600℃超超临界机组的技术研发及工程实践,除锅炉、汽轮机部分高温材料及部分泵和阀门尚未实现国产化外,其他已基本形成了 600℃超超临界机组整体设计、制造和运行能力,建立起了完整的设计体系,拥有了相应的先进制造设备及加工工艺,这些为我国 700℃超超临界燃煤发电机组的发展奠定了良好的基础。

二、超临界锅炉的发展方向

洁净燃煤发电技术有几种方法,如整体煤气化联合循环(IGCC)、增压流化床联合循环(PFBC)及超超临界技术(USC)。超超临界燃煤发电技术经过几十年的发展,目前已经是