

西安电力高等专科学校 编
大唐韩城第二发电有限责任公司



600MW火电机组培训教材

锅炉分册



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

600MW 火电机组培训教材

锅炉分册

西安电力高等专科学校 编
大唐韩城第二发电有限责任公司



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本套《600MW 火电机组培训教材》是由西安电力高等专科学校和大唐韩城第二发电有限责任公司联合组织编写的。本分册是其中的《锅炉分册》，全书共分为十二章：概述，水循环及蒸发设备，过热器和再热器，省煤器和空气预热器，燃烧设备，制粉设备，送风机、引风机和一次风机，吹灰系统及设备，锅炉阀门，600MW 机组锅炉的启动和停运，锅炉的运行调整和锅炉的常见故障。

本套教材以大唐韩城第二发电有限责任公司 600MW 机组的设备和控制系统为主，结合国内 600MW 机组的情况，以实用为出发点，突出 600MW 机组的设备、系统特点，注重基本理论与实践的结合，注重知识深度与广度的结合，注重专业知识与操作技能的结合，可以作为 600MW 机组运行、检修人员、技术和管理人员的培训教材，还可以作为相关专业大、中专院校的教材和教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

600MW 火电机组培训教材. 锅炉分册/西安电力高等专科学校, 大唐韩城第二发电有限责任公司编. —北京: 中国电力出版社, 2006
ISBN 7-5083-4093-0

I. 6... II. ①西... ②大... III. ①火力发电-发电机-机组-技术培训-教材 ②火电厂-锅炉-技术培训-教材
IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 008069 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 395 千字
印数 0001—3000 册 定价 31.00 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)

《600MW 火电机组培训教材》

编 委 会

主 任：张 明 王元春

副主任：李新民 解建宝 张宝瑞 蔺昌宇 齐 强

委 员：孙文杰 冯宏涛 孙朝阳 何 方 宁海琪

杨升军 刘佩芬 张建丁 赵 丽 付妍玉

赵胜林 贾品丽 党争奎 穆顺勇 梁振武

杨曙光 田 风 王军峰 王崇军

丛书主编：解建宝 蔺昌宇

丛书主审：李新民 齐 强 宁海琪

《锅炉分册》

主 编：何 方

主 审：李新民

参 编：郭迎利 戚红梅 李中贤 毛旭波

李海松 冯德群 付妍玉

前 言

随着我国经济的快速发展,高参数、大容量、低能耗、小污染、高自动化程度的600MW机组将逐渐成为主力机组,近几年来,有一大批600MW机组相继投产,通过培训提高生产人员和技术人员的技术水平是确保机组安全、经济、可靠运行的基础。本套培训教材由西安电力高等专科学校和大唐韩城第二发电有限责任公司联合组织编写。本套教材共分为《锅炉分册》、《汽轮机分册》、《电气分册》、《仪控分册》、《集控分册》、《辅助系统分册》六个分册。

本套教材在西安电力高等专科学校张明教授和大唐韩城第二发电有限责任公司王元春高级工程师为主任的编委会的精心组织下,用两年多的时间,由具有丰富的大机组培训教学经验的教师和具有丰富生产实际经验的工程技术人员共同完成。内容以大唐韩城第二发电有限责任公司600MW机组的设备和控制系统为主,并结合国内600MW机组的情况,以实用为出发点,突出600MW机组的设备、系统特点,注重基本理论与实践的结合、注重知识的深度与广度的结合、注重专业知识与操作技能的结合,可以作为600MW机组运行、检修人员、技术和管理人员的培训教材,还可以作为相关专业大、中专院校的教材和教学参考书。

《锅炉分册》为本套教材的一个分册。全书共十二章,内容以韩城第二发电厂一期工程600MW机组的锅炉设备和系统为主,辅以相关的基础理论。全书系统地介绍了从美国燃烧工程公司(CE)引进或引进CE技术制造的600MW机组所采用的控制循环锅炉的设备、系统及其设计特点,以及锅炉机组的启动、停运、运行调整和常见事故等内容,对制粉系统及其主要设备、风机、吹灰设备以及常用锅炉阀门等也做了较为详细的说明。

本书由西安电力高等专科学校何方担任主编,参加本分册编写的人员有:郭迎利(第一、二章),戚红梅(第三、九章),李中贤(第四章),毛旭波(第五、十一章),何方(第六、八章),李海松(第七章),冯德群(第十章),付妍玉(第十二章)。

本分册由韩城第二发电有限责任公司高级工程师李新民负责主审,西安电力高等专科学校高级工程师齐强和大唐韩城第二发电有限责任公司工程师宁海琪、杨升军参与了审稿工作。他们对原稿进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见。本书由编审委员会集体定稿。

本书在大纲审定及编写过程中得到了大唐韩城第二发电有限责任公司工程师宁海琪、杨升军等技术人员的大力支持;西安电力高等专科学校副校长解建宝和主任齐强提出了宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

由于水平和条件所限,书中不妥之处,敬请读者指正。

编 者

2005年12月于西安

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 600MW 发电机组锅炉发展概况	2
第二节 HG-2045/17.3-PM6 型控制循环锅炉	9
第二章 水循环及蒸发设备	16
第一节 水循环原理	16
第二节 汽包	21
第三节 水冷壁及系统	25
第四节 锅炉水循环泵	27
第三章 过热器和再热器	36
第一节 600MW 锅炉过热蒸汽和再热蒸汽系统	36
第二节 600MW 锅炉过热蒸汽和再热蒸汽的温度调节	46
第三节 过热器和再热器的热偏差	50
第四节 过热器和再热器运行中的主要问题	53
第四章 省煤器和空气预热器	60
第一节 省煤器	60
第二节 空气预热器	63
第五章 燃烧设备	76
第一节 燃料和燃烧原理	76
第二节 煤粉燃烧器	81
第三节 炉膛	87
第四节 测温探针	90
第五节 点火装置和油燃烧设备	92
第六节 火焰检测系统	99
第六章 制粉设备	101
第一节 煤粉特性和品质	101
第二节 制粉系统	103
第三节 磨煤机	106

第四节	给煤机	115
第五节	中速磨煤机的运行特性及调整	120
第六节	直吹式制粉系统的运行	125
第七章	风机	134
第一节	概述	134
第二节	轴流式送风机	138
第三节	轴流式送风机的调节	143
第四节	引风机	146
第五节	风机在运行中的常见问题	148
第六节	风机的启停与维护	151
第八章	吹灰系统及设备	154
第一节	概述	154
第二节	吹灰系统的布置	155
第三节	吹灰器结构和工作原理	159
第四节	吹灰器的运行	166
第九章	锅炉阀门	172
第一节	概述	172
第二节	闸阀	173
第三节	截止阀	174
第四节	调节阀	175
第五节	安全阀	178
第六节	止回阀和截止—止回阀	180
第七节	吹灰减压阀	182
第十章	600MW 机组锅炉的启动和停运	184
第一节	锅炉的启动	184
第二节	锅炉的热态启动	194
第三节	控制循环锅炉启动过程中的若干问题	197
第四节	锅炉的停运	199
第五节	锅炉停运后的保养	206
第十一章	锅炉的运行调整	209
第一节	汽包锅炉的运行特性	209
第二节	锅炉汽压和汽温的调节	214
第三节	汽包水位调节	221
第四节	燃烧调整	223

第十二章 锅炉常见事故	233
第一节 汽包水位事故	233
第二节 燃烧事故	234
第三节 锅炉受热面管损坏	239
第四节 空气预热器故障	242
第五节 制粉系统事故	245
第六节 锅炉水循环泵故障	249
参考文献	251

第一章 概 述

1981年,我国第一台单机容量600MW火电机组——元宝山电厂二期工程开工建设,标志着我国电力工业开始步入大容量、高参数、高自动化时期。自此,600MW级火电机组在我国得到迅速发展。目前,哈尔滨、四川东方、上海三大发电设备制造基地代表了我国发电设备自主产业能力。正在运行的200多套300MW火电机组中,国产化机组占70%,运行的40余套600MW火电机组中,国产机组占1/4。据2004年年底统计,国内三大锅炉生产基地生产的600MW级锅炉中,哈尔滨锅炉厂生产近20台,四川东方锅炉厂生产8套共计16台,上海锅炉厂也有8台的生产业绩。由四川东方锅炉厂生产的华能沁北电厂一期工程1号600MW级超临界压力机组锅炉一次水压成功后,9月30日又一次并网成功,标志我国600MW级超临界压力机组国产化技术取得成功,并为我国机械制造和电力行业迈上新台阶奠定坚实基础。

我国的一次能源结构决定了我国发电必然是以煤电为主的基本格局,这是长期难以改变的,也是我国和国际一次能源利用主流不同的显著特征。2002年底,我国燃煤火力发电装机容量占全国总装机容量的74.5%,发电量占全国总发电量的80%以上。按照2020年全国GDP“翻两翻”的发展要求,届时全国总装机容量将达到9~9.5亿kW,发电量将达到42000亿kW·h左右,其中火电装机比重仍然占70%左右。但是,基于历史的原因,我国火电机组平均单机容量不足100MW,平均供电煤耗率达399g/(kW·h),比国外先进水平高70~80g/(kW·h),即高出25%以上。

加快电力发展,必须提高能源转换和利用效率,减少环境污染,实现可持续发展战略。我国是一个人均水资源相对匮乏的国家(人均2200m³/a),全国需水量已接近可利用水量的极限,所以,在发展火力发电时,必须高度重视节约发电用水的问题。“节能、环保、节水”已成为21世纪中国火力发电特别是燃煤发电的主题,同时也是我国火力发电领域必须解决的技术难题。燃煤发电技术把努力提高发电效率放在第一位,这不仅仅是节能的重要技术措施,也是减少环境污染、温室气体(CO₂)排放和降低发电水耗的重要途径,同时也是缓解今后煤炭供应日趋紧张的重要技术措施。

国内现有运行机组资源浪费严重,废气排放量大,所以投运大幅度提高发电效率、采用洁净煤燃烧技术的超临界压力机组,成为我国可持续发展、节约能源、保护环境的重要措施。超临界压力机组配之以高效烟气净化技术以其发电效率高、发电煤耗低、CO₂排放量和耗水量低等特点成为我国火力发电机组的发展方向,而600MW级燃煤机组是世界多数工业发达国家重点发展的火电主力机组。随着国产600MW级机组的技术消化、改进和提高,运行可靠性将越来越高,对电网的安全、稳定、经济运行起着十分重要的作用,并将逐渐替代300MW机组,成为我国今后大力发展的主力机组。

第一节

600MW 发电机组锅炉发展概况

一、600MW 机组典型锅炉简介

国产的 600MW 级锅炉多采用亚临界压力控制循环锅炉，一次中间再热，采用中速磨煤机正压直吹式制粉系统，平衡通风，露天布置。在连续安全运行（不结渣）、满负荷出力以及经济燃烧三个方面，达到国际先进水平。

表 1-1 给出我国已经投运的典型 600MW 级锅炉。从表 1-1 中可以看出，600MW 级燃煤机组锅炉设备基本上是从国外引进或者通过消化吸收引进技术制造的。其设备或技术基本上从美国燃烧工程公司（CE）、拔柏葛公司（B&W）以及福斯特·惠勒公司（FW）引进，许多国家的锅炉，包括我国国产锅炉，在不同程度上承袭了上述三个公司的设计特点。

二、锅炉蒸发系统内工质的流动形式

锅炉蒸发系统内工质的流动方式主要有自然循环、控制循环、直流式及直流复合循环四种。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参数。国内目前 600MW 级锅炉主要有自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉三种型式。

（一）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。目前国内已投运的 600MW 级自然循环锅炉设备主要是从拔柏葛公司（B&W）和福斯特·惠勒（FW）公司引进的。自然水循环是依靠上升管和下降管中工质平均密度之差而进行的，随着压力从 5.092MPa 上升到 20.678MPa，下降管内的水密度仅减少约 10%，而水冷壁管内的密度则几乎保持不变，仍能维持足够的有效压头。自然水循环具有适应炉膛吸热量变化而进行自调节的优点，吸收热量最多的管子通过的水量也最多，可防止传热不均现象的产生。此外，自然循环不需要用循环泵，投资及运行费用均可减少。

（二）控制循环锅炉

控制循环锅炉技术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了此种锅炉的制造技术，由哈尔滨锅炉厂生产的 600MW 级控制循环锅炉相继在安徽平圩电厂、浙江北仑发电厂、哈尔滨第三发电厂、天津盘山电厂、内蒙古托克托电厂以及韩城第二发电厂投运。在国内以后还会有不少电厂安装这种类型的 600MW 级锅炉。

控制循环锅炉的主要特点是在锅炉循环回路的下降管侧加装循环泵以提高循环回路的运动压头，因此汽包及上升管、下降管可采用较小的直径。但是，加装了循环泵，运行时需消耗一定的功率，一般情况下循环泵消耗的功率相当于锅炉功率的 0.3%~0.4%。

（三）直流锅炉

直流锅炉也是大容量锅炉发展方向之一。特别是采用超临界压力的锅炉，直流锅炉是唯一能采用的锅炉型式。1949 年，原苏联安装了第一台超临界压力实验机组，所采用的本生型直流锅炉出口参数为 29.4MPa、600℃，炉膛蒸发受热面管是多次上升垂直管屏。由于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，会产生热应力，因此对膜式水冷壁的焊缝会起破坏作用。通用压力型锅炉（UP 型直流锅炉）是拔柏葛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压力还是超临界压力，均可采用

典型 600MW 级锅炉主要参数特性

表 1-1

工程名称	形式	型号或制造地	最大连续 蒸发量 (t/h)	汽包压力 (MPa)	过热器出 口压力 (MPa)	过热器 出口温度 (°C)	再热器 出口压力 (MPa)	再热器 出口温度 (°C)	给水 温度 (°C)	空气预热器 型式
石洞口二厂	直流锅炉	瑞士 SULZER、 美国 CE 公司	1900	25.4			4.57	569	285	
邹县电厂 5 号、 6 号锅炉	汽包锅炉	FWEC - 2020/18.10, 美国	2020	18.09	17.09	541	3.62	541	271.7	三分仓 再生式
扬州第二发 电厂 1 号机组	亚临界压力 自然循环 汽包锅炉	B&W2000/18.56, 巴威公司	2000	18.56	17.39		3.75	541	275	
北 仑 电 厂	亚临界压力 强制循环 汽包锅炉	美国 CE 公司	2008	19.42	18.2		3.64		272.5	三分仓 回转式
	亚临界压力 自然循环 汽包锅炉	CAROLINA, B&W 公司	2027	19.5	18.19	540	4.05	540	271.3	
	亚临界压力 强制循环 汽包锅炉	IHI - FW, RHR 公司	2045	18.38	17.26		4.11		273	
平圩电厂 1 号、 2 号机组	亚临界压力 强制循环 汽包锅炉	HG2008/186 - M, 哈尔滨锅炉厂	2008	19.42	18.29	540.6	3.64	540.6	278.3	33 - VI 回转式
哈尔滨第三热电厂 3 号、4 号机组	强制循环锅炉	HG - 2008/18.2 - YM ₂ , 哈尔滨锅炉厂		20.62	18.27					
元宝山电 厂	本生型直流炉	德国	1832.65		18.6	545	4.116	545	257.4	风罩回转 再生式
沙角 C 电 厂	亚临界压力 强制循环 汽包锅炉	HG - 2008/18.2 - HM ₅ , 哈尔滨锅炉厂	2008	18.29	17.31	540	3.64	540.6	278.3	三分仓 蓄热板 转动式
	汽包锅炉	CCTRR - 70, ABB - CE	2100.1	20.5	18.2		4.16	542.7	275	三分仓 回转式
盘山电 厂	直流锅炉	JLn1650 - 25 - 545 - κT, 俄罗斯	1650				4.15		267	双分仓 回转式
伊敏电 厂	超临界压力 直流锅炉	JLn1650 - 25 - 545κT, 俄罗斯			25	545	4		545	271

的炉型，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。采用内螺纹管可防止蒸发段产生膜态沸腾。对于 UP 型炉来说，一般用于大型超临界压力直流炉，为了确保水冷壁管内的质量流速，被迫采用较小水冷壁管径，因而对直流炉水冷壁的安全带来极为不利的因素。

不论本生型直流炉还是一次垂直上升的 UP 型直流炉，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，存在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型式（垂直上升）不能与之相适应，因此拔柏葛公司、德国斯坦因缪勒公司等人在炉膛的辐射受热面的结构型式上相继采用螺旋型上升管圈。管圈自炉膛底部沿炉膛四周盘旋上升至炉膛折焰角处，炉膛上部管屏改变为垂直上升管屏，以利于管子穿墙及悬吊结构的布置。这种管圈的优点是热偏差小，且除进出口联箱外，无中间混合联箱，不会产生汽水混合物的不均匀分配问题，因此可做成全焊接的膜式水冷壁管圈。目前国内引进的 600MW 级直流锅炉就是这种型式，从炉底到折焰角部位采用螺旋管圈，炉膛上部采用垂直上升管屏，锅炉采用塔式结构布置型式。

三、燃烧方式

目前国内引进的或引进技术制造的 600MW 级锅炉，其燃烧系统主要采用 CE 公司的传统设计技术，即四角布置直流燃烧器的切圆燃烧方式，再热汽温调节采用摆动燃烧器，配置中速磨煤机的直吹式制粉系统，如北仑电厂 1 号锅炉、平圩电厂两台引进技术制造的 600MW 级锅炉以及石洞口第二电厂两台超临界压力 600MW 级锅炉。另外一种典型燃烧系统是采用拔柏葛公司 (B&W) 和福斯特·惠勒公司 (FW) 的传统设计技术，采用旋流燃烧器前墙或前后墙对冲布置方式，制粉系统采用 MPS 磨煤机或双进双出筒式钢球磨煤机的直吹式系统，再热汽温调节一般采用烟气挡板。如北仑电厂 2 号锅炉、邹县电厂 600MW 级锅炉。元宝山电厂的 600MW 级锅炉由于燃用褐煤，配置了八套风扇磨煤机的直吹式制粉系统，煤粉燃烧器为八角切圆燃烧方式。

近年来，为了改善锅炉对燃料特性变化的适应性，提高低负荷下燃烧稳定性，适应煤的清洁燃烧要求，降低 NO_x 的生成量，以及提高锅炉机组运行的经济性，对 600MW 级锅炉的燃烧器结构做了不少的改进，概括起来有以下几点。

(一) 四角切圆布置直流燃烧器

1. 采用高调节比的煤粉喷嘴

为了提高锅炉在低负荷时燃烧的稳定性和适应性，美国燃烧工程公司 (CE) 对一次风喷嘴的结构做了改进。在煤粉喷嘴管内装置水平肋片，并改进了喷嘴头部的装配，使喷嘴出口截面与入口截面相等。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。下半部出口气流的煤粉浓度小，能及时为已经着火的煤粉补充氧气。在此基础上，CE 公司又发展了一种新的一次风喷嘴，并称之为高调节比喷嘴。喷嘴头部做成可分别摆动的两部分，它们的摆动角相差可达 24° ，这样，如同在一次风喷嘴出口装有钝体一样，在一次风气流中可以形成一个回流区，进一步提高了着火稳定性。

2. 采用低 NO_x 燃烧器

采用两级燃烧（或称分级燃烧），用大约 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），从而降低主燃烧区段温度，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，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。两级燃烧是燃烧过程中控制 NO_x 生成较为有效的方法。美国燃烧工程公司在大容量煤粉炉上普遍推广采用燃尽风（over fire air, OFA），即在四角布置直流燃烧器喷口的最上端再布置 2~3 层燃尽风喷口，将大约 10%~25% 总风量的风从此处送进炉膛上部。目前，从 CE 公司引进设备或引进 CE 公司技术制造的 600MW 级锅炉，其四角布置直流燃烧器的最上方都布置了两层 OFA（燃尽风）喷口。

3. 强调减少炉膛出口水平烟道左右两侧烟温差、流速偏差

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，以及防止过热器、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，炉膛出口气流存在残余旋转，在水平烟道左右两侧引起气流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。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。国产 600MW 机组锅炉在设计上采用较大的炉膛截面，较小的炉膛宽深比，较大的燃烧器上排喷口至屏底的距离以及炉膛高度，合理布置煤粉管道，以减少气流残余旋转，有利于消除热偏差。此外，在设计上采用同心反切的技术，配用 OFA 和部分二次风消旋，可以使炉内气流的旋转强度具有一定的可调性。

如上海锅炉厂最新研发的 600MW 机组亚临界压力、一次中间再热、控制循环锅炉，采用摆动式燃烧器四角切圆燃烧方式。燃烧器下部二次风与一次风喷嘴偏转一定的角度，合理采用不同的二次风偏转结构，使炉内空气动力场有利于稳定燃烧，降低了氮氧化物（ NO_x ）排放量，减少了结渣和高温腐蚀等。这种燃烧技术在渭河电厂、秦皇岛热电厂 300MW 锅炉上获得了成功应用。600MW 锅炉炉膛冷态试验表明，炉膛出口的气流旋转强度很弱，水平烟道的气流分布也很均匀。一次风喷嘴采用不等间距布置，上部喷嘴间距增大，以减轻残余旋转。增加燃烧器高度，可降低燃烧器区域壁面热负荷，避免结渣。

（二）墙式布置旋流燃烧器

1. 采用分级燃烧的方式，降低 NO_x 的生成率

所谓分级燃烧亦称“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，而将其余空气由二次风口引入燃烧器，这样可降低燃烧区域的过量氧量，以减少 NO_x 的生成量。目前国内引进的 600MW 机组锅炉的旋流燃烧器为双调节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，其设计思想就是使燃烧过程按二段燃烧方式进行，达到稳燃和遏制 NO_x 生成的目的。

对于旋流燃烧器，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，为使过程按两段燃烧方式进行，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，然后两者再进行混合。将二次风分成风量和旋转强度分别可调的二股，从而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以分别控制。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，燃尽过程随着两者的混合而进行与完成。 NO_x 及 SO_x 的生成一方面因内部燃烧区的氧气浓度低而受到遏制，另一方面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。

2. 前后墙对冲燃烧方式的改进

对于前后墙对冲燃烧方式，拔柏葛公司作了某些改进。采用一台磨煤机供应沿炉膛宽度方向上的一排燃烧器，这样使炉膛宽度方向上热输入分布均匀，每排燃烧器的风量都可单独控制。当磨煤机出现故障时，可减少风量及燃料分配的不均匀。

四、炉膛结构设计

炉膛设计应满足以下要求：首先，炉膛容积应足够大，使燃料完全燃烧，并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，应保持烟气流量均匀，使炉膛出口温度维持稳定，以防止对流受热面产生结渣、堵灰及金属超温等问题。

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。拔柏葛公司设计的锅炉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较大。炉膛单位截面的热容量根据灰分结渣情况不同而取值 $4.85 \sim 5.82 \text{MW/m}^2$ ，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。为解决积灰问题，福斯特·惠勒（FW）公司在设计上采取一系列措施，例如：

- (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，使在灰斗倾斜槽及炉墙等处易结渣的部位形成一层由空气形成的防护层，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) 加大管排的横向间距。

五、国外大型机组锅炉的技术经济指标及发展方向

（一）技术经济指标

1. 机组的可靠性

电站锅炉的可靠性是机组的主要技术经济指标之一。有人认为采用超临界压力机组的可

可靠性要低于亚临界压力机组，但日本始终认为超临界压力机组与亚临界压力机组一样具有较高的可靠性，大容量超临界压力机组的事故停机率低于1%。

2. 机组运行经济性

原苏联 800MW 机组全国平均煤耗率由 1970 年的 $350.6\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 降到 1980 年的 $327.3\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。美国 16.56MPa、538/538℃ 级机组平均煤耗率为 $354\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，24MPa、538/550/565℃ 级机组平均煤耗率为 $337\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

3. 负荷适应性

各国 600MW 级机组大多都能承担一部分中间负荷运行。锅炉负荷在 60%~100% 范围内，基本上都能保持全燃煤运行，且能保证蒸汽温度在额定值。

(二) 我国电站锅炉技术发展方向

在电力体制改革后，我国电力行业形成了多家发电公司相互竞争的局面，这将促进先进技术的研发和广泛应用。当前火力发电领域需要认真研究和解决的技术问题有以下几点：

1. 燃煤发电技术要将努力提高发电效率放在第一位

提高发电效率不仅是节能的重要措施，也是减少环境污染、温室效应气体 (CO_2) 排放和降低发电水耗的重要途径，同时也是缓解今后煤炭供应日趋紧张的重要技术措施。

最近国家 863 “超临界压力燃煤发电技术” 课题组子课题——关于“我国发展超临界压力发电机组的技术选型研究” 报告，提出的结论是：

(1) 在诸多洁净煤发电技术中，超临界压力发电技术配之以高效烟气净化技术是最有技术继承性、最具条件在短时间内实现规模化生产、优化火电结构，使燃煤发电技术更上一个台阶的重要技术方向。

(2) 在使用目前国际上已经应用和成熟的耐热钢材基础上，通过技术引进、中外合作和技术创新，积极发展我国自己的超超临界压力技术，实现燃煤发电技术的阶跃式发展，在技术上是可行的。

(3) 我国目前阶段合理优化的超超临界参数为 25.28MPa/600℃/600℃，其发电效率可达到 44.63%，比目前的水平将提高 6.3%；发电煤耗为 $275\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，比目前的水平降低 $80\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； CO_2 排放量可降低 10% 以上，发电水耗可降低 6%；单机容量推荐为 600MW 等级和 1000MW 等级两种。

2. 燃煤发电技术要突出环境保护

通过技术措施降低燃煤发电对环境的污染，这是长久之计，也是当务之急。据联合国环境计划署 (UNEP) 在全球环境监测项目收集的资料分析，20 世纪 90 年代中期全球每年排放 SO_2 约 2.94 亿 t，其中 1.6 亿 t 是由燃煤和燃油排放所致，发电约占 50% 略多。我国 2001 年公布的数字，全社会排放 SO_2 近 2000 万 t，其中电力排放 726 万 t，约占 36%。这说明积极减少 SO_2 排放对发电领域来讲任务相当繁重。经过多年的努力，到 2003 年年底全国将投运约 800 多万千瓦机组的烟气脱硫装置，但在 2.65 亿千瓦的火电设备总容量中仍然只占百分之几，大大低于发达国家的脱硫水平 (美国 1998 年为 12%)，而且费用仍比较高。从 20 世纪 90 年代开始，通过国际合作方式，电力部门组织实施了燃煤电厂烟气脱硫试验项目和示范项目。目前，我国已具备了大型火电机组脱硫系统的设计、建造、调试及运行能力，可基本满足我国火电厂烟气脱硫工程建设的需求。在氮氧化物的排放控制方面，新建大

型燃煤机组全部按要求同步采用低氮氧化物燃烧方式，一批现有电厂结合技术改造安装了低氮燃烧器。目前，正在建设或已经招标的安装烟气脱硝装置的电厂约有 6000MW。

燃煤发电每生产 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电能，就产生约 0.7kg 的 CO_2 。减排 CO_2 的主要措施包括：

(1) 大力实施节能技术，在发电领域努力提高发电效率。经过计算，燃煤机组的发电效率每提高 1%，其 CO_2 的排放量将减少 2%。

(2) 努力调整电源结构，发展可再生能源（包括水电、风电）、太阳能和核能等，减少矿物燃料的使用。

(3) 发展氢燃料发电，即发展燃料电池。

3. 燃煤发电技术要将降低火力发电的水耗作为重要课题

我国水资源相对匮乏，特别在煤炭储量比较集中的地区更是短缺，而燃煤发电需要大量的循环冷却水、工业冷却水和化学补充水。通常水冷机组每百万千瓦的耗水量为 $1\text{m}^3/\text{s}$ ，国际先进水平可降低至 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ 以下，我们的平均水平仍然普遍较高。因此，在研究火力发电技术中必须把“节约用水，降低水耗”作为重要的课题，努力提高发电厂用水的复用指数，采用先进的污水处理技术，实施零排放（ZLD）；研究矿井水的先进处理方法，利用矿井水作为循环水的补充水；在严重缺水地区采用大容量空冷机组，降低百万千瓦的水耗。

4. 改善大型燃煤机组调峰性能

提高发电机组在低负荷和变负荷下运行的水动力学稳定性和燃烧稳定性，保持高的发电效率。

5. 开展对超临界压力机组中应用的耐高温材料的研究

要为合理使用耐热钢材，保证高温部件的安全，延长其使用寿命、降低建设成本和运行成本，提出优化措施，为超临界、超超临界压力机组的批量生产、建设和运行安全提供技术指导。

(三) 国外电站锅炉技术发展动向

1. 超临界压力机组的设计

1980年由美国电力研究所（EPRI）召开的有关各种蒸汽参数机组经济性的讨论会上，BBC（ABB）公司提出采用 31MPa 、 $566/566^\circ\text{C}$ 这一挡参数的机组为最经济；CE 公司提出 31MPa 、 $583/552/566^\circ\text{C}$ 这一挡参数机组的发电成本为最低廉，并且将进一步发展参数为 31MPa 、 $566/579/593^\circ\text{C}$ 的机组，以期望提高 2% 的热效率。

日本电源开发公司超临界压力机组参数的发展目标是：① 31MPa 、 $566/566/566^\circ\text{C}$ ；② 31MPa 、 $641/593/593^\circ\text{C}$ ；③ 34.5MPa 、 $649/593/593^\circ\text{C}$ 。最终目标是期望比现有的超临界压力机组（ 24.1MPa 、 $538/538^\circ\text{C}$ ）的热效率提高 6%~7%。

联邦德国在 1979~1981 年间曾对超临界参数进行了研究，结论是从锅炉方面来看，采用 29.89MPa 、 600°C 的 $750\sim 1000\text{MW}$ 机组，在现有条件下是完全可以实现的，但是受到中间负荷、调峰运行条件的限制，给发展这档机组带来了不利。

发展超临界压力机组必须使用高强度材料，以防管子厚度过分地增加。在防止高温腐蚀方面，应考虑金属壁温、烟气温度以及在具有腐蚀性元素的烟气中的受热面布置方式，同时也有必要考虑采用表面经过防蚀处理的金属管材或具有防蚀性强的外层管的双层套管结构。

目前日本钢管公司为发展超临界参数机组，正在研究新的高强度耐热钢种，此钢种可用于温度为 650°C 的过热蒸汽，许用应力达到 5.7MPa ，比现有的 304HTB、321HTB、

347HTB 的强度还高。

2. 发展变压运行机组, 提高负荷适应性

由于螺旋形管圈直流炉的各根管子吸热均匀, 所以超临界压力直流锅炉完全可以在亚临界压力范围内作变压运行。美国、日本传统的超临界压力直流锅炉都是垂直管圈, 基本上不适宜变压运行, 对此, 各公司都在其传统的产品上做了不少改进工作。

(1) 日本三菱公司在开展超临界压力垂直管圈变压运行机组的开发工作时, 设计上采取下列措施:

- 1) 采用内螺纹管以防止工质偏离核态沸腾点;
- 2) 加装水冷壁节流圈以防止炉膛四角和中心部位管子的吸热偏差;
- 3) 在烟道内布置蒸发器以保证水冷壁出口工质即使在 25% 负荷下也能在湿蒸汽范围内。

(2) 美国燃烧工程公司和日本三菱公司在其辅助循环锅炉的基础上新设计了“CC”型的低倍率循环锅炉。主要措施是采用内螺纹管, 使循环倍率降低到 2.670。由于循环倍率的降低, 使辅助循环泵的功率消耗下降, 这部分的得益完全可以补偿因采用内螺纹管而引起的成本增加。“CC”型低倍率循环锅炉可以适应变压运行的需要。

(3) 美国福斯特·惠勒公司以及日本石川岛播磨公司在其传统的多次上升—下降直流锅炉上, 加装内置式分离器及变更旁路系统, 可作变压运行。

(4) 在新设计的自然循环锅炉上采用内螺纹管以防止运行中工质偏离核态沸腾点并增加机组的可靠性。在一级过热器之前装设一旁路系统, 以便在启动及低负荷运行时将过多的蒸汽引入到凝汽器去, 使过热蒸汽温度与汽轮机金属温度有良好的匹配, 并用饱和蒸汽调节汽温, 保证锅炉可以快速启停和变负荷运行。

3. 炉内燃烧方面

由于动力用煤品位的不断下降, 锅炉不但要能燃用各种劣质煤, 而且要考虑防止因燃用劣质煤带来的不利影响(结渣、积灰、磨损、环境污染等)。各公司普遍重视煤质(包括灰成分)的研究, 并在新一代燃煤机组设计中充分考虑。

另一方面, 为满足环境保护要求, 各锅炉制造公司都从燃烧系统的设计上考虑了抑制和减少 NO_x 生成的措施。

大容量机组锅炉的最大经济性在于保持尽可能高的可用率。为此, 各公司在设计中都在炉膛燃烧热强度和受压部件强度选择方面采取比较保守的方案。在水冷壁设计中, 为了防止偏离核态沸腾点, 提高机组的安全可靠性, 即使原来不采用内螺纹管的一些公司, 目前也都倾向于采用内螺纹管, 以提高机组运行的可靠性。

第二节

HG-2045/17.3-PM6 型控制循环锅炉

一、韩城第二发电厂锅炉主要设计参数

韩城第二发电厂一期 $2 \times 600\text{MW}$ 机组锅炉由哈尔滨锅炉厂引进美国燃烧工程公司(CE)技术设计和制造, 其型式为亚临界压力、一次中间再热、控制循环单汽包固态排渣煤粉炉, 采用平衡通风、直流燃烧器四角切圆燃烧方式。主要设计参数见表 1-2。