

600MW超临界

循环流化床锅炉设备与运行

胡昌华 卢啸风 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是为适应超临界循环流化床锅炉技术迅速发展的需要而编写的。本书针对600MW超临界循环流化床锅炉,介绍了大型循环流化床锅炉的气固流动特性、传热特性、燃烧过程与污染控制特性。本书重点介绍了世界首台600MW超临界循环流化床锅炉的系统布置和结构特性、辅机系统配置及其主要设备的结构与工作原理;简要介绍了超临界循环流化床锅炉的控制特性及控制系统;着重阐述了超临界循环流化床锅炉的运行调整和事故处理;最后介绍了大型电站循环流化床锅炉的燃烧调整与运行优化试验方法。

本书理论阐述通俗易懂,并引用了大量的工程实例,内容丰富,实用性强,可作为从事超临界循环流化床电站锅炉研究、设计、安装、调试、运行、检修等工作的技术人员、管理人员及大专院校相关专业师生的参考书,也可作为超临界循环流化床锅炉运行人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

600MW超临界循环流化床锅炉设备与运行/胡昌华,卢啸风编著. —北京:中国电力出版社,2012.2
ISBN 978-7-5123-2689-7

I. ①6... II. ①胡... ②卢... III. ①循环流化床锅炉-锅炉运行 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第021929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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年7月第一版 2012年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 32印张 731千字

印数 0001—3000册 定价 198.00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

《600MW 超临界循环流化床锅炉设备与运行》

编 审 委 员 会

主 编 胡昌华

副主编 卢啸风 雷秀坚

参 编 唐 俊 杨世明 邱建能

主 审 王蜀湘 李星华 陶世健 张文清 周嗣林

谭 云 陈建斌 邝 伟 严 勤 王泉海

前 言

循环流化床（CFB）燃烧技术由于具有燃料效率高、污染小、煤种适应性好、负荷调节范围大等优点，在世界各主要工业国家得到大力发展和推广应用。近年来，国外投运的循环流化床锅炉最大容量已达到 460MW，蒸汽参数已达到超临界参数，国内循环流化床锅炉用户市场更是以几何数量级增长。我国在“十五”（2001—2005）期间，开展了超临界循环流化床锅炉方案的初步研究，随后将超临界循环流化床锅炉的研究列入国家“十一五”科技支撑计划的重大项目。2008 年，国家发展和改革委员会批准在四川内江白马循环流化床示范电站建设世界最大容量的 600MW 超临界循环流化床锅炉发电示范工程，预计 2012 年投产发电，这标志着我国的超临界循环流化床锅炉技术已进入世界先进行列。

随着循环流化床锅炉超临界参数时代的来临，国内大型循环流化床电站锅炉的设计、安装、调试、运行、检修人员以及大中专学校相关专业的师生，迫切需要一本系统介绍超临界循环流化床锅炉设备结构、系统配置、运行特性、现场试验的专业参考书。本书就是为满足这一要求而编写的。

本书除绪论外，共分八章。绪论介绍了循环流化床锅炉的基本结构和发展概况，第一章介绍了循环流化床锅炉流态化基础，第二章和第三章重点介绍了 600MW 超临界循环流化床锅炉的系统布置和结构特性，第四章着重介绍了 600MW 超临界循环流化床锅炉的辅助系统及其主要设备的结构特性，第五章讨论了 600MW 超临界循环流化床锅炉的控制系统，第六章和第七章分别探讨了 600MW 超临界循环流化床锅炉的运行调整和大型循环流化床锅炉的事故处理，第八章叙述了大型电站循环流化床锅炉的常规试验。

本书的作者们从事流化床燃烧技术研究、循环流化床锅炉安装、运行及检修等应用工作已 20 余年，近年参与了国内主要大型循环流化床锅炉工程建设和运行调试工作，尤其是 600MW 超临界循环流化床锅炉的研发工作。600MW 超临界循环流化床锅炉机组是目前世界上在建容量最大的循环流化床机组，是我国具有自主知识产权的发电机组，凝聚了我国循环流化床科技工作者几十年的研究成果。

由于在世界上没有现成的经验可以借鉴，因此本书作者根据有关研究资料和锅炉厂家、设计院、大专院校的有关技术资料，四川白马循环流化床示范电站管理人员多年积累的经验，以及与其他大型循环流化床设计、科研、建设、运行单位技术人员共同探讨研究中获得的大量第一手资料，编著而成。

本书理论阐述通俗易懂，并引用了大量的工程实例，内容丰富，实用性强。

本书可作为大型循环流化床电站锅炉管理人员、运行人员、检修人员以及工程技术人员的培训用书，也可作为大型循环流化床研究人员、设计人员、建设单位技术人员的参考资料。

本书在编写过程中，大量引用了国外著名锅炉制造商、锅炉辅机制造商公开发表的各种技术资料，还大量参考或使用了清华大学、西安热工研究院、中科院工程热物理研究所、浙江大学、东方锅炉股份有限公司、哈尔滨锅炉股份有限公司、上海锅炉厂有限公司、西南电力设计院、西北电力设计院、重庆大学、四川白马循环流化床发电有限责任公司等单位的研究成果或技术资料，在此表示深深的感谢。

作者特别感谢国家发展和改革委员会自主研发 600MW 超临界循环流化床锅炉专家组的专家们在多次专题会议上，对 600MW 超临界循环流化床锅炉的各种技术问题的精辟分析，使作者受益匪浅。

本书由胡昌华组织编写，由卢啸风统稿。王泉海重新绘制了部分插图并参与文稿的校对工作。由于水平所限，加之当今大型循环流化床锅炉技术的快速发展，书中谬误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2012 年 1 月

目 录

前言

绪论	1
第一节 我国煤炭资源开发及其利用现状	1
第二节 国外大型循环流化床锅炉技术发展概况	3
第三节 国内大型循环流化床锅炉技术发展概况	12
第一章 循环流化床锅炉流态化基础	20
第一节 循环流化床锅炉基本结构及工作原理	20
第二节 流态化现象及其基本特征	29
第三节 气固流动与传热传质特性	43
第四节 循环流化床锅炉物料平衡、压力平衡与热平衡特性	65
第五节 煤在循环流化床中的燃烧过程	75
第六节 循环流化床锅炉污染物控制与灰渣综合利用	88
第二章 600MW 超临界循环流化床锅炉系统布置	111
第一节 循环流化床锅炉总体布置及膨胀系统	111
第二节 大型循环流化床锅炉风烟系统及主要设备	135
第三节 600MW 超临界循环流化床锅炉汽水系统	142
第四节 600MW 超临界循环流化床锅炉防磨结构	152
第五节 600MW 超临界循环流化床锅炉耐火材料	166
第六节 600MW 超临界循环流化床锅炉密封防堵结构	180
第三章 600MW 超临界循环流化床锅炉结构特性	184
第一节 600MW 超临界循环流化床锅炉炉膛结构	184
第二节 600MW 超临界循环流化床锅炉水冷壁结构布置	210
第三节 高温旋风分离器及回料器结构和工作原理	232
第四节 外置床结构布置与传热特性	243
第五节 过热器与再热器结构布置及汽温调节特性	253

第六节	600MW 超临界循环流化床锅炉省煤器结构与系统布置	271
第七节	600MW 超临界循环流化床锅炉空气预热器结构与布置	275
第八节	尾部受热面磨损、积灰、腐蚀及其预防	289
第四章	600MW 超临界循环流化床锅炉辅助系统	295
第一节	600MW 超临界循环流化床锅炉燃煤制备系统及其主要设备	295
第二节	600MW 超临界循环流化床锅炉给煤系统及其主要设备	314
第三节	白马 600MW 超临界循环流化床锅炉底渣系统及其主要设备	330
第四节	白马 600MW 超临界循环流化床锅炉点火与启动循环系统	345
第五节	石灰石制备与除灰系统	360
第六节	600MW 超临界循环流化床锅炉紧急补水系统	379
第五章	600MW 超临界循环流化床锅炉控制系统	383
第一节	600MW 超临界循环流化床锅炉主要控制回路及其控制特性	383
第二节	白马 600MW 超临界循环流化床锅炉控制方案	393
第六章	600MW 超临界循环流化床锅炉的运行调整	426
第一节	循环流化床锅炉结构布置与热平衡特性对运行调整的影响	426
第二节	循环流化床锅炉关键运行参数的控制与调节	436
第三节	600MW 超临界循环流化床锅炉启动	441
第四节	600MW 超临界循环流化床机组正常运行监视和调整	457
第五节	600MW 超临界循环流化床锅炉停运	464
第七章	大型循环流化床锅炉事故处理	469
第一节	事故处理原则	469
第二节	循环流化床锅炉运行异常现象及其处理	469
第三节	循环流化床锅炉典型事故现象及其处理	476
第八章	循环流化床锅炉常规试验	485
第一节	循环流化床锅炉冷态流化特性试验	485
第二节	循环流化床锅炉热平衡试验	490
第三节	循环流化床锅炉运行优化试验	497
参考文献	502

绪 论

第一节 我国煤炭资源开发及其利用现状

一、我国的煤炭资源状况

我国煤炭资源储量较为丰富，分布面广，品种齐全。根据第三次全国煤田预测资料，除台湾省外，我国垂深 2000m 以浅的煤炭资源总量为 55 697.49 亿 t，其中探明保有资源量 10 176.45 亿 t，预测资源量 45 521.04 亿 t。在探明保有资源量中，生产、在建井占用资源量 1916.04 亿 t，尚未利用资源量 8260.41 亿 t。在现有探明储量中，烟煤占 75%、无烟煤占 12%、褐煤占 13%。其中，原料煤占 27%，动力煤占 73%。

在已探明的储量中，灰分小于 10% 的特低灰煤占 20% 以上；硫分小于 1% 的低硫煤约占 65%~70%；硫分 1%~2% 的约占 15%~20%。高硫煤主要集中在西南、中南地区。华东和华北地区上部煤层多低硫煤，下部多高硫煤。

煤炭在我国国民经济中占有重要的地位。在能源结构组成中，煤炭约占 75%，其次是石油和天然气以及可再生能源。从传统的能源消费与开采情况看，中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，2010 年煤炭产量已达到 33 亿 t 左右，煤炭消耗量已占到世界能源消耗量的 29%。到 21 世纪中叶，我国以煤为主的能源结构将不会改变，煤炭仍将是当今和今后中国能源的一个最重要的组成部分。

与丰富的煤炭资源相比，我国人均能源资源占有量却只有世界人均占有量的 1/2。我国人均煤炭能源资源占有量只有 233.4t，比世界人均煤炭占有量少 78.3t。因此，节约煤炭资源，尤其是节约优质煤炭资源，是确保国民经济可持续发展的重要措施之一。

二、我国煤炭资源的利用状况

我国生产的动力煤，主要是以燃烧方式将化学能转变为热能而加以利用。每年我国电站锅炉、工业锅炉与工业窑炉，仅发电、供热及工艺用热（烟气或蒸汽）耗煤就占了煤炭总消费量的 2/3 左右。据 2010 年的统计数据^[1]，我国火力发电量约占发电总量的 73.43%（总发电量 42 277.71 亿 kW·h，其中，水电 6867.36 亿 kW·h，火电 34 166.28 亿 kW·h，核电 747.42 亿 kW·h，风电 494 亿 kW·h）。全国 6000kW 及以上容量电厂的平均供电标准煤耗为 333g/（kW·h）。

根据我国能源政策，火力发电厂应以煤为主要燃料，且动力用煤应尽量使用低品位劣

质煤，加之市场经济条件下，电站锅炉燃煤煤质难以保证，煤质存在逐渐下降的趋势，这导致锅炉热效率下降、锅炉运行稳定性和安全性变差。另外，由于国民经济的快速发展，电网负荷的日峰谷差也不断增大，要求锅炉机组应具有较高的负荷调节能力。

三、煤炭开采、利用过程中带来的污染

在煤炭开采过程中会产生的大量煤矸石，煤炭洗煤过程中也会排出洗煤渣（煤泥），这些煤矸石、洗煤渣（煤泥）如果不加以利用，直接堆放在露天，也会造成严重环境污染。随着我国煤炭洗选率逐步提高到 50% 以上，每年由此还会新增 2 亿~3 亿 t 的煤矸石和洗煤渣（煤泥）。为解决煤矸石、洗煤渣（煤泥）的综合利用问题，“十一五”期间，国家有关部门特批 2000 万 kW 容量的循环流化床锅炉机组，用于在煤炭产区建设坑口电厂，燃用煤矸石和洗煤渣等低热值燃料。

以煤炭作为主要能源并且直接燃烧利用，是造成我国严重大气污染的主要原因之一。我国大气污染物中，80% 的粉尘、90% 的 SO_2 、70% 的 NO_x 污染物，都来自煤的直接燃烧过程。煤炭在燃烧过程中，还带来严重的固体废弃物污染。作为燃煤大户的火力发电厂，其环保问题，也越来越受到全社会的关注。

四、燃煤锅炉在火力发电生产中的地位和作用

燃煤锅炉是利用煤燃烧放出的热量加热工质生产具有一定压力和温度的蒸汽的设备，也称为燃煤蒸汽锅炉。蒸汽锅炉按其用途的不同分为电站锅炉和工业锅炉。电站锅炉是指电力工业中专门用于生产电能的锅炉；而用于国民经济其他工业部门的锅炉，常称为工业锅炉。

火力发电厂的生产过程是一个能量转换的过程。这个能量转换过程是通过火力发电厂的三大主要设备即锅炉、汽轮机和发电机来实现的。锅炉将燃料的化学能转换为蒸汽的热能，生产并根据需要供给汽轮机以相应数量和规定质量（如汽压、汽温等）的过热蒸汽；汽轮机将蒸汽的热能转换为汽轮机转子的旋转机械能；发电机，将机械能转换为电能。

由上可知，锅炉是火力发电厂能量转换的首要环节，也是按能源品质而言，效率转换最低的一个环节，因此是最有节能潜力的一个环节。此外，由于锅炉运行耗用大量燃料，因此它工作的状况对整个电厂的经济性影响极大。

电能生产的一个特点是电能很难储存，发电厂的发电量要随着外界负荷的改变而变化，因而发电厂锅炉所产生的蒸汽也必须根据外界的需要而经常变化，以保证及时输送相应数量和规定质量的蒸汽给汽轮机，满足用户的用电需要。由于火力发电厂的能量转换过程是连续进行的，因此电网负荷变化，最终要由锅炉进行适当的燃烧调整来完成，因而锅炉实际上肩负着及时调节发电负荷的重任。这使得锅炉在火力发电厂正常生产运行过程中占有重要的地位。

锅炉也是火力发电厂中受外界因素变化影响最大的设备。市场经济条件下，燃煤品质很难与设计煤质保持一致；天气变化等因素给锅炉燃煤品质也带来一定的影响，因此锅炉工作条件较差。运行中锅炉设备一旦发生故障，必将影响到整个发电生产过程的正常进行。

燃煤锅炉也是火力发电厂中环保工作的重点。火力发电厂对环境的污染，主要来自燃

煤锅炉。因此,搞好燃煤锅炉废气(粉尘、 SO_2 、 NO_x)、废水、废渣的治理,对提高火力发电厂的社会效益和经济效益有很大的作用。

综上所述,燃煤锅炉对火力发电厂能否安全、经济地为社会提供清洁能源,具有重要的作用。为了人类社会的可持续发展,世界各国都在大力推广洁净煤技术,以解决能源资源短缺和环境保护问题。

五、洁净煤技术

所谓洁净煤技术,就是采用多种先进技术,使煤炭利用过程中所产生的环境污染,降低到最低程度。针对现阶段的煤炭利用过程中的大气污染问题,我国推广洁净煤技术的主要目标是要大幅度减少燃煤锅炉的 SO_2 排放,并开始针对 NO_x 排放、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下的飘尘排放以及重金属排放进行控制。

洁净煤技术主要包括煤燃烧前的处理和净化技术、煤燃烧过程中的净化技术、煤燃烧后的烟气净化技术。

煤燃烧前的处理和净化技术主要包括煤的洗选处理、型煤加工、水煤浆技术,以及高效低污染的煤的转化技术,如煤炭气化技术,煤炭液化技术,煤、油共炼技术,以及煤层甲烷气的利用等。

煤炭燃烧过程中的净化技术包括各种炉内脱硫、脱硝技术与消烟除尘技术,如流化床脱硫脱硝燃烧技术、炉内喷钙脱硫技术、型煤固硫技术、燃料再燃脱硝技术等。

煤炭燃烧后的烟气净化技术主要包括烟气脱硫技术、烟气脱硝技术以及各种高效除尘技术等,如各种干法或湿法烟气脱硫装置、各种烟气脱硝装置、静电除尘器与袋式除尘器等。

在现有的多种洁净煤技术中,煤炭燃烧过程中的净化技术,如循环流化床燃烧技术,在现阶段仍具有投资较少、运行费用低、煤种适应性好、市场应用广泛的特点。

以燃煤为主的能源结构、尽量使用劣质煤的火电厂用煤政策、日益下降的煤质与不断提高的火电调峰要求、市场化煤炭采购引起的入厂煤质波动、煤炭开采及使用过程中带来的严重大气污染,以及可持续发展和资源综合利用的要求,都迫切需要一种能高效燃用各种低发热量燃料、具有低污染及良好的调峰能力的新型高效燃煤技术。在这种市场需求的推动下,超临界循环流化床锅炉燃煤技术就应运而生了。与传统燃煤锅炉相比,超临界循环流化床锅炉不仅具有煤种适应性广、燃烧稳定、污染物排放量少且易于控制、负荷调节性好、灰渣可以综合利用等优点,而且由于有较高的蒸汽参数,电厂发电循环效率显著提高,目前在世界各主要工业国家得到大力研发和推广应用。

第二节 国外大型循环流化床锅炉技术发展概况

自从20世纪80年代以来,大型循环流化床锅炉技术在商业化过程中显示出其优良的环境保护特性,其污染控制成本较低,但在达到较高的供电效率方面并未具有明显的优越性,因此提高蒸汽的压力和温度并增加其容量已成广泛共识。随着循环流化床大型化的发展和世界首台亚临界250MW再热循环流化床锅炉于1996年顺利投运,以及300MW等

级燃煤循环流化床锅炉的商业化，国际上在 20 世纪末展开了超临界循环流化床锅炉的研究。从技术角度来看，循环流化床和超临界都是成熟技术，两者的结合相对技术风险不大，结合后的技术综合了循环流化床低成本污染控制及超临界高供电效率两个优势，在燃料价格、材料成本、制造水平上，具有巨大的商业潜力，是一个具有明显优势的燃煤发电技术。超临界循环流化床锅炉技术，几乎降低了所有的污染物排放，包括 CO₂、SO₂、NO_x、Hg、粉尘等，同时还减少了发电煤耗、减少了发电水耗、减少了排灰量等。

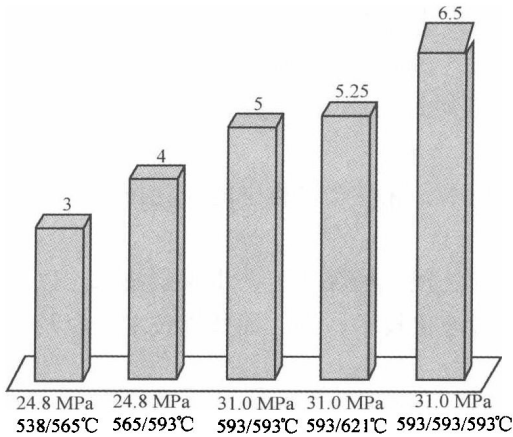


图 0-1 超临界参数机组发电循环净效率的提高值

以亚临界参数机组为基准，蒸汽参数提高后，机组发电循环净效率的提高值见图 0-1。

在超临界煤粉炉中，由于炉膛中的燃烧比较集中，热负荷分布不均，工质的热偏差较大，再加上工质温度较高，因此水冷壁部件的冷却能力是关键之一，而循环流化床锅炉炉膛内的温度水平和热流密度比煤粉炉低得多，降低了对水冷壁冷却能力的要求。循环流化床炉膛内的热流密度在炉膛底部最大，且随着炉膛高度的增加而逐渐减小，热流最大值出现在工质温度最低的炉膛下部区域，有利于水冷壁金属温度的控制。在煤粉炉中，炉膛内热流曲线的峰值所对应的工质温度较高。循环流化床锅炉的低温燃烧使得炉膛内的温度水平低于一般煤灰的灰熔点，再加上炉膛内较高的固体颗粒浓度，所以水冷壁上基本没有积灰结渣，保证了水冷壁的吸热能力。与煤粉炉相比，循环流化床锅炉炉膛内的温度非常均匀，尤其是宽度和深度方向上的热负荷分布比煤粉炉均匀得多。可见，循环流化床所具有的特性使其更适合与超临界技术相结合。

超临界循环流化床（SC 循环流化床）锅炉兼备了循环流化床燃烧技术和 SC 蒸汽循环的优点。超临界循环流化床锅炉作为下一代循环流化床燃烧技术，由于可以得到较高的供电效率，烟气净化（脱硫、脱硝）的初投资和运行成本比烟气脱硫低 50% 以上，是一种很适于大量推广的高效洁净煤发电技术，其商业前途十分光明，因此在国内外受到高度重视。

国际上在 20 世纪末就展开了超临界循环流化床锅炉的研究。国外的主要研发商有美国 Foster Wheeler 公司（简称 FW 公司）、ALSTOM 法国分公司和 ALSTOM 美国分公司等。

（一）美国 Foster Wheeler（FW）公司的超临界循环流化床锅炉技术^[2~5]

FW 公司所设计的超临界参数直流锅炉采用本生技术、方形分离器以及整体式再循环热交换器（INTREX）的紧凑设计，见图 0-2。锅炉从 35% 负荷至 100% 负荷时按线性滑压方式运行，亚临界向超临界的转折点大约在 75% 负荷，见图 0-3。

该设计充分吸收了波兰 Turow 电厂的 4~6 号炉的经验，在锅炉两侧分别布置 4 个冷

却式方形分离器，再热蒸汽调温主要通过调节进入 INTREX 灰流量的比例以及尾部双烟道调节挡板的位置来实现。分离器和 INTREX 均由膜式壁构成，它与炉膛形成紧凑式布置。工质从四面炉墙的底部进入炉膛，然后向上流动至布置在炉膛顶部的出口集箱。炉膛底部水冷壁为光管，以降低流动阻力。中间和上部水冷壁采用内螺纹管，以防止在低负荷亚临界工况时，蒸汽质量流量较低而产生传热恶化。FW 公司采用该技术方案设计的世界

第一台 460MW 超临界循环流化床锅炉，安装在波兰 Lagisza 电厂，并于 2009 年初投入商业运行，见图 0-4。该锅炉设计煤种参数见表 0-1，实测性能参数见表 0-2。

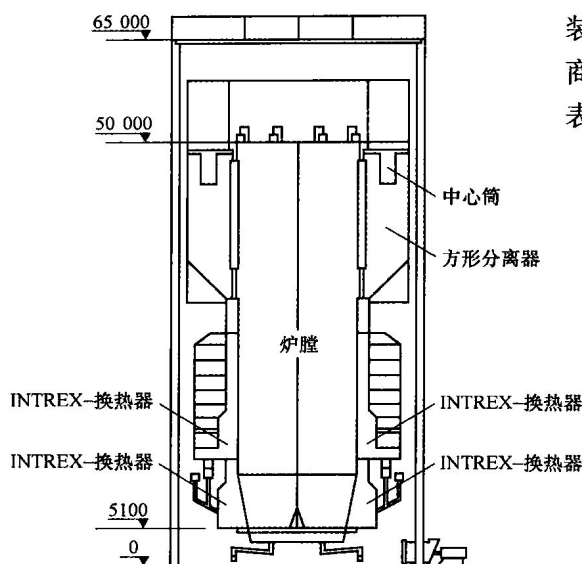


图 0-2 FW 公司超临界循环流化床锅炉简图

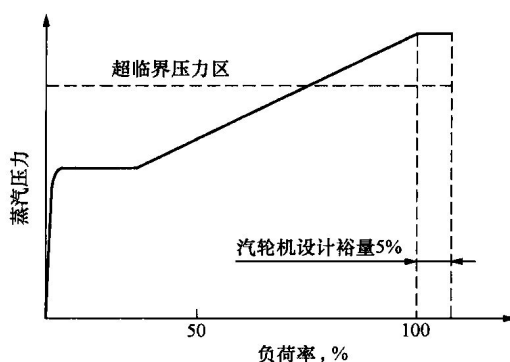


图 0-3 FW 公司超临界循环流化床锅炉运行方式

该锅炉基于波兰 Turow 电厂 235MW 循环流化床锅炉上进行的热流测量和炉内流动的三维模型进行设计，最大连续主蒸汽流量为 359.8kg/s，最小连续主蒸汽流量为 143.9kg/s，汽轮机入口处蒸汽压力为 27.5MPa，汽轮机入口处蒸汽温度为 560℃；再热蒸汽流量为 306.9kg/s，再热蒸汽入口压力为 5.46MPa，再热蒸汽温度为 314.3℃，汽轮机入口再热蒸汽温度为 580℃。这是世界上第一台超临界循环流化床锅炉。该锅炉于 2009 年 6 月交付商业运行后，运行状态良好。图 0-5 为锅炉在 100% 负荷时的运行数据。

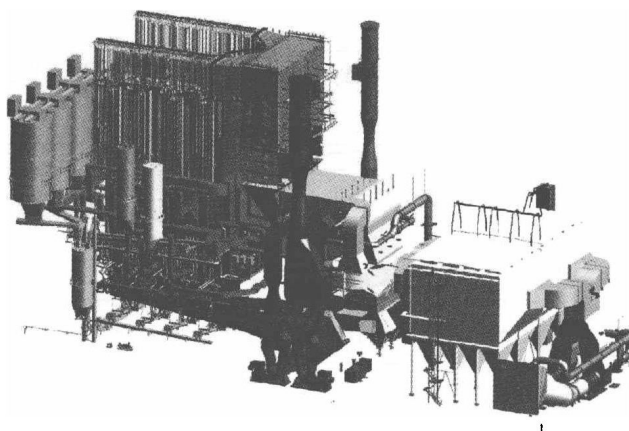


图 0-4 Lagisza 电厂 460MW 超临界循环流化床锅炉

表 0-1 波兰 Lagisza 电厂 460MW 超临界循环流化床锅炉设计煤质资料

成分	煤种	烟 煤		煤泥浆 ^① (<30%)	
		设计煤种	实际燃煤	范围	范围
LHV (MJ/kg)		20	20.75	18~23	7~17
水分 (%)		12	10.3	6~23	27~45
灰分 (%)		23	24.7	10~25	28~65
硫分 (%)		1.4	0.86	0.6~1.4	0.6~1.6
氯 (干态) (%)		<0.4	N/A	<0.4	<0.4

① 设计要求燃烧最高至 50% 的洗煤厂的洗矸和 10% 的生物质燃料。

表 0-2 波兰 Lagisza 电厂 460MW 超临界循环流化床锅炉实测性能参数

性能参数	40%MCR		60%MCR		80%MCR		100%MCR	
	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值	实测值	设计值
主蒸汽流量 (kg/s)	144		205		287		361	361
主蒸汽压力 (MPa)	13.1		17.2		23.1		27.1	25.7
主蒸汽温度 (°C)	556		559		560		560	560
再热蒸汽压力 (MPa)	1.9		2.8		3.9		4.8	5.0
再热蒸汽温度 (°C)	550		575		580		580	580
床温 (°C)	753		809		853		889	
排烟温度 (°C)	80		81		86		88	
烟气 O ₂ (%)	6.8		3.8		3.4		3.4	
锅炉效率 (%)	91.9	91.7	92.8	92.3	92.9		93.0	92.0

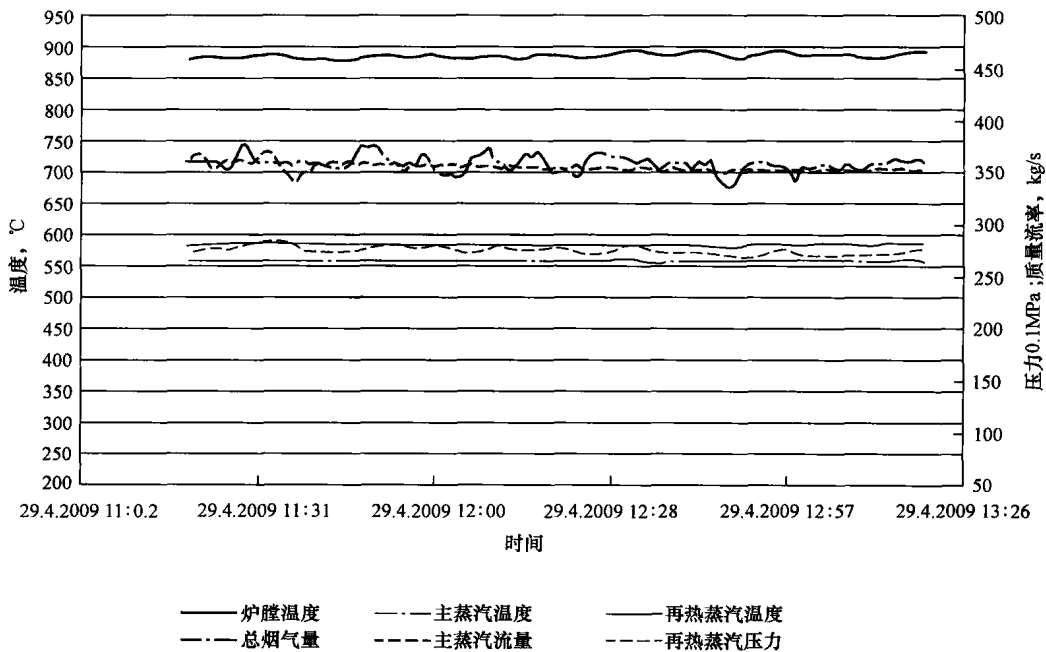


图 0-5 波兰 Lagisza 电厂 460MW 超临界循环流化床锅炉 100% 负荷时的运行参数

FW 公司签订的第二台超临界循环流化床锅炉合同，容量为 330MW，燃用无烟煤及不超过 30% 的无烟煤洗煤浆。业主是俄罗斯电力机械建设公司，安装在俄罗斯南部的罗斯托夫地区 Novocherkasskaya 电厂，计划于 2012 年底投入商业运行，见图 0-6。

该炉最大连续主蒸汽流量为 278kg/s，汽轮机入口蒸汽压力为 24.8MPa，汽轮机入口蒸汽温度为 565℃；再热蒸汽流量为 227kg/s，锅炉进口再热蒸汽压力为 4.0MPa，汽轮机入口再热蒸汽温度为 580℃。锅炉设计排放标准为：SO₂ 小于 400mg/m³，NO_x (NO₂) 小于 300mg/m³，CO 小于 300mg/m³。

2011 年 7 月，美国 FW 公司获得了韩国南方动力公司 Samcheok 绿色动力项目 (Samcheok GreenPower Project) 的锅炉订单，将为该项目提供 4 台 550MW 的超临界循环流化床锅炉，该锅炉设计采用本生垂直管直流锅炉技术，燃用煤与生物质混合物并达到相应排放标准。该发电机组计划于 2015 年 6 月投入运行，见图 0-7。

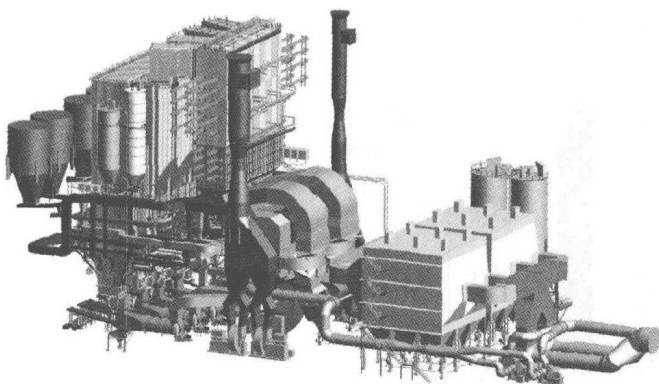


图 0-6 FW 公司设计的 330MW 超临界循环流化床锅炉示意图

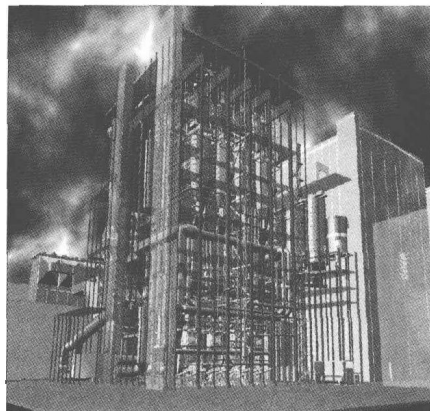


图 0-7 550MW 超临界循环流化床锅炉方案示意图

近年来，FW 公司在美国能源部支持下，联合多家企业，正在大力开发 800MW 级超超临界循环流化床锅炉。800MW 超超临界循环流化床锅炉的研发项目开始于 2005 年，目前已对 800MW 超超临界级循环流化床锅炉的锅炉设计、蒸汽循环、排放性能、动态特性和经济性等进行了详细的研究。参加该研发计划的有福斯特惠勒公司、芬兰国家技术研究中心 (VTT)、西班牙的 Endesa Generación 电力公司、德国西门子公司、西班牙 Rundacion CIRCE 公司、希腊 Hellas 研究和技术中心。该项目有两个锅炉方案，其设计参数见表 0-3。

第一方案蒸汽参数为 30MPa/600℃/620℃ 的常规超超临界循环流化床锅炉，已于 2009 年底开发出容量为 800MW 常规超超临界循环流化床直流锅炉方案，见图 0-8。

表 0-3 800MW 超超临界循环流化床锅炉设计参数

项 目	第一方案	第二方案	项 目	第一方案	第二方案
过量空气为 20%时 炉膛出口温度 (°C)	853	851	总灰量 (t/h)	68	67
煤流量 (t/h)	238	236	蒸汽参数 (MPa/°C/°C)	30/600/620	35/700/720
石灰石流量 (t/h)	48	47	主蒸汽流量 (t/h)	2054	1972
空气流量 (t/h)	2478	2452	再热蒸汽流量 (t/h)	1760	1596
烟气流量 (t/h)	2697	2668	机组总功率 (MW)	778	805

注 Ca/S=2.4, 脱硫效率=96%。

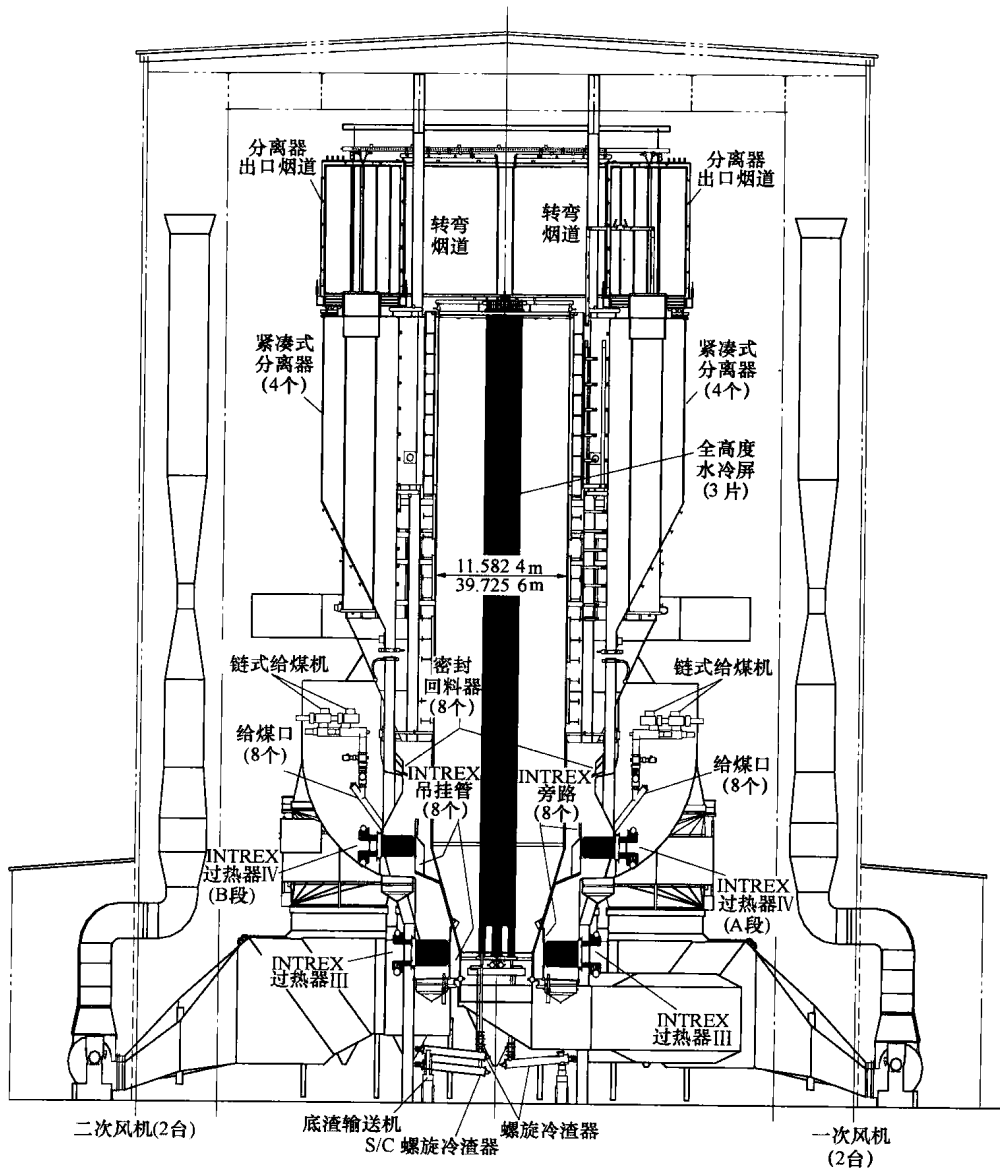


图 0-8 蒸汽参数 30MPa/600°C/620°C 的 800MW 超超临界循环流化床锅炉方案示意图 (一)

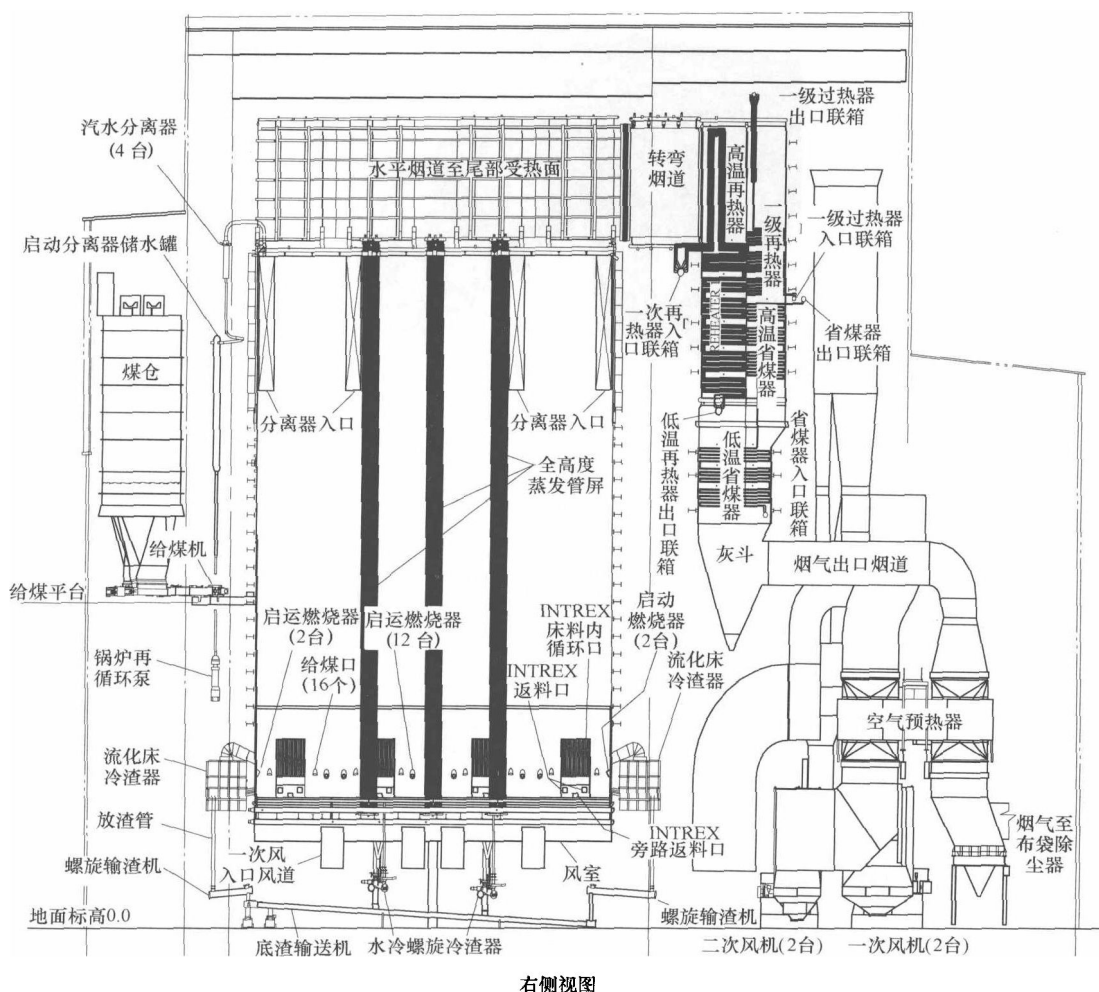


图 0-8 蒸汽参数 30MPa/600℃/620℃的 800MW 超超临界循环流化床锅炉方案示意图 (二)

第二方案蒸汽参数为 35MPa/700℃/720℃的先进超超临界循环流化床锅炉，见图 0-9，其发电净效率可达 53%。

(二) 法国 Stein 公司设计的超临界循环流化床锅炉

Stein 在设计 Provence 电站的 250MW 循环流化床锅炉时，已经考虑到循环流化床锅炉容量放大的问题，即采用将 Emile 125MW 循环流化床锅炉容量增加一倍的方法。Stein 的循环流化床燃烧技术发展目标是将机组容量增加至 600MW，它是基于放大设计经验以及 Provence 250MW 经验，并进一步改善机组的效率。从加尔达恩电厂收集了大量的数据，通过对实际性能与预计结果的比较，对他们原有的几个模型进行了修正。对大容量循环流化床锅炉，Stein 设想采用 30MPa/580℃/580℃/580℃二次再热，并研究了关键的合金钢管在 600~680℃温度下的性能。

Stein 公司目前已经完成了 600MW 超临界循环流化床锅炉的设计，并将由法国电力公司实施示范工程。该 600MW 超临界循环流化床锅炉的燃烧室截面积为 306m²，蒸汽温

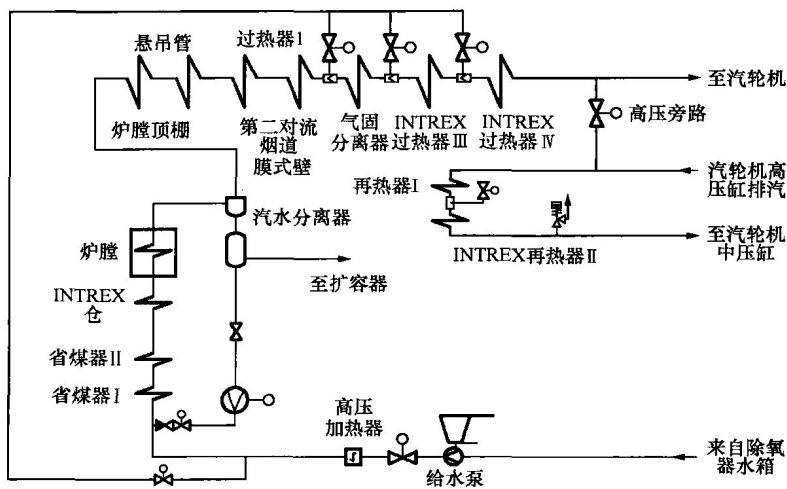
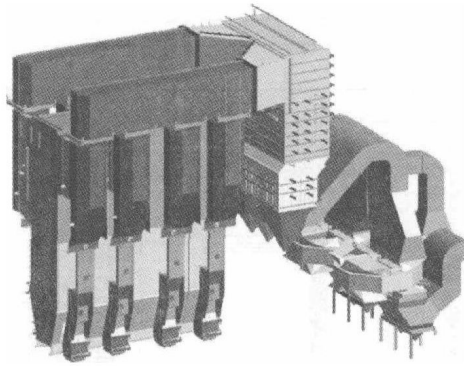


图 0-9 蒸汽参数 35MPa/700℃/720℃的 800MW 先进超超临界循环流化床锅炉方案示意图

度为 600℃，单炉膛双布风板 6 个冷却式分离器和相应的 6 个冷却式炉墙构成外置换热器，见图 0-10。其主要设计特点如下：

(1) “裤衩腿”型单炉膛、双布风板，垂直管型水冷壁以避免磨损。

(2) 设有 6 个蒸汽冷却常规高效旋风分离器。

(3) 设有 6 个外置热交换器。外置床内布置的受热面有中温过热器（ITS I和 ITS II）、低温过热器（LTS）、高温再热器（HTR）和水冷受热面（省煤器）。

(4) 对每组 3 个旋风分离器配置 1 个蒸汽冷却旋风分离器出口烟道。

该锅炉过热蒸汽流量为 483kg/s，过热蒸汽压力为 27.6MPa，过热、再热蒸汽温度均为 602℃，再热蒸汽压力为 6MPa，给水温度为 290℃。该示范工程的目标是要保证低污染物排放水平下的低发电成本以及运行灵活性。预计 NO_x 的排放小于 150mg/m³，SO₂ 的排放小于 250mg/m³。

Stein 公司对 600MW 超临界循环流化床锅炉的性能进行了详细的研究，尤其是燃烧