

超超临界火电机组丛书

锅炉设备与运行

张 磊 李广华 主编

新 机 组
新 材 料
新 工 艺
新 技 术



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

超超临界火电机组丛书

锅炉设备与运行

张 磊 李广华 主编
尤 冲 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



本书是《超超临界火电机组丛书》之一。

全书共十三章,主要讲述 1000MW 级超超临界锅炉系统与设备的原理、结构特点、特性、运行知识、材料和焊接新技术等,内容包括 1000MW 级超超临界电站锅炉介绍、煤粉和煤粉制备、燃料燃烧优化技术与先进的燃烧设备、超超临界机组脱硫技术、超超临界锅炉汽水系统与风烟系统、超超临界锅炉新材料、超超临界锅炉焊接新工艺和锅炉运行。

本书可供 1000MW 级超超临界锅炉运行、检修人员培训使用,也可供 1000MW 级超超临界火电机组设计、制造、安装技术人员和大中专院校热动类专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备与运行/张磊,李广华主编. —北京:中国电力出版社,2007.6

(超超临界火电机组丛书)

ISBN 978-7-5083-5801-7

I. 锅… II. ①张…②李… III. 火电厂-锅炉运行
IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 083038 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

*

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 606 千字 3 插页

印数 0001—3000 册 定价 55.00 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

《超超临界火电机组丛书》

编 委 会

主 任	张效胜	白 桦	李怀新		
主 编	张 伟	李延群			
副主编	张 磊	孙奎明	宋志明	张 华	马明礼
	李广华	李洪战	代云修	高洪雨	苏庆民
	王庆民	曹 伟	张新春	尤 冲	孟 强
	赵 勇	井绪成	李彦红	王长征	付深清
	魏丰年	魏毓璞			
参 编	刘红蕾	兰胜增	霍永红	柴 彤	周长龙
	廉根宽	张伟(邹县电厂)	杜 峰	宋勇军	
	曹善勇	姚秀娟	康 凯	刘继则	张 琳
	王丽英	孔庆雨	袁冬雨	宗 珂	张传胜
	刘晓亮	何修年	刘浩伟	白国华	徐文平
	赵书新	丛 晓	贾敬臣	闫修峰	王光新
	张传伟	刘国新	陈 炜	蒋建设	尹 君
	陈寿爱	胡志宏	王士奎	尤 华	

序

能源是人类经济发展、生活水平提高、文明进步的基础。人类通过对能源的大规模的利用,满足了社会不断发展和生活水平不断提高的需要。但能源利用过程中排放的污染物(粉尘、二氧化硫、氧化氮,碳氢化合物、微颗粒、温室气体等)也正在急剧破坏着地球的生态平衡和人类自身的生存环境。

目前,我国电力工业正向建设高效、节能、环保的能源洁净利用方式飞速发展,对煤炭的高效清洁利用的需求尤为突出,超超临界机组是实现高效大规模清洁利用煤炭的最重要手段之一。

目前,我国已有数台 1000MW 级超超临界机组正式投产,全国还有大量的 1000MW 级超超临界锅炉正在建设和筹建中。与成熟的亚临界电站锅炉相比,1000MW 级超超临界锅炉的初步运行已经出现了一些新现象和新问题,对机组的设计、运行优化、控制监测及污染防治都提出了新的更高的要求。因此,迫切需要与现场经验紧密结合,进行相关的研究归纳,为 1000MW 级超超临界锅炉的设计和运行优化提供理论和技术支持。

为帮助火电技术人员尽快掌握世界一流的超超临界发电技术,实现超超临界发电机组设计和制造国产化,提高火电制造业的国际竞争力,保证电力工业节能降耗和清洁生产,山东省电力学校与华电国际邹县发电厂合作,组织编写了《超超临界火电机组丛书》,为 1000MW 级超超临界火电机组的设计、制造、运行提供了有益的参考,对我国电力工业的可持续发展作出了重要贡献。

丛书紧密结合现场实际,内容翔实、数据充分,既可供高校师生和工程技术人员参考,也可为发电企业机组运行水平的提高提供有益帮助。因此,本丛书的出版发行,将为我国电力工业向超超临界大容量、高参数、高效节能、环境友好的新一代发电方式的前进发挥有益的推进作用。



于浙大求是园

2007年4月20日

前言

目前,火电机组已向大容量、高参数、高效率的超超临界机组发展。超超临界发电技术是在超临界发电技术基础上发展起来的一种成熟、先进、高效的发电技术,可以大幅度提高机组的热效率,在国际上已经是商业化的成熟发电技术,在可用率、可靠性、运行灵活性和机组寿命等方面可以和亚临界机组相媲美。近十几年来,世界上许多发达国家都在积极开发和应用超超临界参数发电机组。随着超超临界火电机组的国产化,我国在今后新增的火电装机结构中必将大力发展超超临界火电机组。超超临界发电技术是我国电力工业升级换代,缩小与发达国家技术与装备差距的新一代技术。超超临界发电技术的发展,还将带动制造业、材料工业、环保工业和其他相关产业的发展,创造新的经济增长点,是电力工业可持续发展的战略选择。表 0-1 列出了超超临界发电机组和常规发电机组在热效率提高的幅度、燃料节约量、温室气体排放量减少方面的数据对比。从表 0-1 可知,超超临界发电机组具有无可比拟的优越性。

表 0-1 超超临界发电机组和常规发电机组节能和减排潜力的对比

1000MW 机组容量		常规对比机组	第一阶段	第二阶段	第三阶段
蒸汽 条件	压力 (MPa)	24.1	31.4	30.0	34.3
	温度 (°C)	538/566	593/593/593	630/630	649/593/593
热效率增加值 (%)		基准值	5.0	4.8	6.5
年节煤量 (t)		基准值	96000	95000	13400
CO ₂ 年减排量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		基准值	117	112	152

发展超超临界机组,设计和制造还有许多关键技术问题有待解决,其中,开发热强度高、抗高温烟气氧化腐蚀和高温汽水介质腐蚀、可焊性和工艺性良好、价格低廉的材料是最关键的问题。在所选蒸汽参数下,应分析锅炉、汽轮机各部件所选用的材料、壁厚、用材量、造价、运行性能和技术经济;还应验证新材料的持久强度、蠕变强度、断裂韧性、低周疲劳特性、设计应用安全系数,热应力寿命损耗特性、工艺性等。

国内首批 1000MW 级超超临界火电机组引进技术国产化依托工程——华电国际邹县发电厂四期工程 $2 \times 1000\text{MW}$ 工程项目加快了 1000MW 级超超临界火电机组的国产化进程,全面提高了大型火电机组的设计、制造、运营水平。邹县发电厂的两台 1000MW 级超超临界燃煤凝汽式汽轮发电机组,是国内单机容量最大、运行参数最高的燃煤发电机组,被列为国家重点建设工程,其中 7 号机组从 2005 年 1 月 15 日开工建设至 2006 年 12 月 4 日投产发电仅用了 22 个月零 19 天。满负荷试运期间,7 号机组各项性能指标均达到优良标准,机组运行平稳,自动、保护、仪表投入率 100%,平均负荷率 100%。该机组的顺利投产,实现了“安全最好、质量最优、工期最短、造价最低”的工程建设目标。8 号机组将于 2007 年 7

月投产发电，届时邹县发电厂装机总容量将达到 4540MW，成为我国改革开放以来电力工业发展的窗口企业。

《超超临界火电机组丛书》的编写主要以华电国际邹县发电厂 1000MW 级超超临界机组的发电技术为主要内容，由山东省电力学校和华电国际邹县发电厂合作完成。《超超临界火电机组丛书》共分《锅炉设备与运行》《汽轮机设备与运行》《电气设备与运行》《热工自动化》四分册。《锅炉设备与运行》涵盖了 1000MW 级超超临界锅炉整体设计、燃烧系统、制粉系统、汽水系统、承压部件材料、焊接技术、除尘除灰设备、风烟系统、锅炉运行等内容；《汽轮机设备与运行》包括汽轮机本体、金属材料、热力系统及设备、凝汽设备及系统、主要水泵、汽轮机调节、保护及供油系统、辅助系统和汽轮机运行等内容；《电气设备与运行》主要包括同步发电机及其辅助系统、励磁系统、同步发电机的正常运行与维护、同步发电机的非正常运行与事故处理、电力变压器及运行、电气设备及系统、继电保护及运行、自动装置及运行等内容；《热工自动化》包括 1000MW 级超超临界机组控制系统硬件组成、1000MW 级超超临界机组控制与保护、现场总线技术在火电厂中的应用、1000MW 级超超临界机组仪表及执行机构、1000MW 级超超临界机组外围辅助车间控制等内容。

中国工程院院士岑可法教授高度关注《超超临界火电机组丛书》的出版发行，并欣然为之作序。

《超超临界火电机组丛书》由山东省电力学校校长张效胜、华电国际副总经理白桦（原邹县发电厂厂长）、邹县发电厂厂长李怀新出任编委会主任，由山东省电力学校副校长张伟和邹县发电厂副厂长李延群担任主编，其中《锅炉设备与运行》由山东省电力学校张磊、李广华主编，《汽轮机设备与运行》由山东省电力学校张磊、马明礼主编，《电气设备与运行》由山东省电力学校宋志明、李洪战主编，《热工自动化》由邹县发电厂张华、山东省电力学校孙奎明主编。全套丛书由山东省电力学校张磊统稿。

本丛书在编写过程中，中国东方电气集团公司、西北电力设计院、山东省电建一公司、山东省电建三公司、山东省电力研究院、山东省电力咨询院、中国电力科技网提供了大量的技术资料，给予了大力支持和热情帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于水平所限，加之时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请广大读者提出批评。

编者

2007 年 6 月



本书前言

《超超临界火电机组丛书》由山东省电力学校和华电国际邹县发电厂合作编写，主要以山东省 1000MW 级超超临界火电机组系统及设备的结构特点、原理、功能和性能为编撰重点，突出 1000MW 级超超临界火电机组技术特点。

本书是《超超临界火电机组丛书》之一，共十三章，主要内容有超超临界电站锅炉介绍、煤粉和煤粉制备、燃料燃烧优化技术与先进的燃烧设备、超超临界锅炉汽水系统和风烟系统、超超临界锅炉新材料和焊接新工艺、超超临界机组脱硫技术、锅炉运行。本书力求编写新原理、新技术，尽量做到内容全面，理论与实际相结合。

本书由山东省电力学校张磊、李广华主编，华电国际邹县发电厂杜峰参与编写。张磊编写第一～四、六、七、十一～十三章，李广华编写第五、九、十章，杜峰编写第八章。全书由华电国际邹县发电厂尤冲同志审稿。

本书在编写过程中，得到华电国际邹县发电厂、山东电力研究院、山东电建一公司的大力支持和热情帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于水平所限，加之时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者提出批评。

编者

2007 年 6 月

目录

序

前言

本书前言

第一章 概述	1
第一节 超超临界锅炉发展概况	1
第二节 大型超(超)临界压力锅炉的选型	5
第三节 超(超)临界锅炉和汽轮机蒸汽参数的匹配	9
第四节 我国超超临界机组技术参数与结构选型的研究	15
第二章 超超临界锅炉	21
第三章 煤及煤粉监视技术及制粉设备	39
第一节 电厂燃料管理新设备和新技术	39
第二节 煤粉品质对锅炉燃烧影响的试验研究及检测	48
第三节 磨煤机	63
第四节 给煤机	88
第四章 燃烧优化技术及燃烧设备	98
第一节 燃烧优化技术	98
第二节 超(超)临界锅炉炉膛燃烧方式	106
第三节 超(超)临界锅炉低 NO_x 燃烧新技术	116
第四节 超超临界锅炉燃烧设备及系统	126
第五章 超(超)临界锅炉蒸发受热面水动力循环	143
第一节 直流锅炉水动力循环基本形式	143
第二节 直流锅炉蒸发受热面的水动力特性分析	146
第三节 超(超)临界锅炉水冷壁选型	151
第四节 超临界直流锅炉流量分配特性的实验研究	161
第五节 直流锅炉水动力特性计算理论与系统控制的发展方向	169
第六章 超超临界机组炉内汽水系统	172
第一节 省煤器	172
第二节 水冷壁	172
第三节 过热器、再热器及其调温装置	178
第七章 超(超)临界锅炉承压部件材料	192
第一节 超(超)临界锅炉承压部件材料	192
第二节 超(超)临界机组新型耐热钢分析	204

第八章 超(超)临界锅炉焊接工艺	218
第一节 超(超)临界锅炉用新型铁素体耐热钢的焊接.....	218
第二节 我国超(超)临界电站焊接技术需要研究的问题.....	233
第九章 风烟系统及设备	240
第一节 DG3000/26.15-Ⅱ型风烟系统	240
第二节 送、引风机及一次风机	240
第三节 空气预热器.....	261
第十章 除尘除灰设备及系统	282
第一节 除渣系统.....	282
第二节 电除尘器.....	285
第三节 除渣设备.....	289
第十一章 超超临界锅炉脱硫技术	296
第十二章 锅炉点火前的准备工作	307
第一节 超超临界参数机组的水汽品质控制.....	307
第二节 锅炉化学清洗.....	313
第三节 锅炉吹管.....	322
第十三章 DG3000/26.15-Ⅱ型锅炉运行	333
第一节 锅炉启动与停运.....	333
第二节 锅炉运行维护.....	349
第三节 锅炉连锁保护与试验.....	359
第四节 锅炉事故处理.....	372
参考文献.....	383

第一章 概 述

第一节 超超临界锅炉发展概况

目前,我国装机总容量约6亿kW,居世界第2位,煤电装机量约占装机总量的75%,煤电占我国发电总量的81%。据国际能源署(IEA)2002年世界能源展望中的“中国能源展望”预测,中国GDP到2020年翻两番后,发电量为48130亿kW·h,其中煤电35030亿kW·h,需要总装机容量10.87亿kW。与GDP翻两番的目标相适应,2020年前,我国每年平均要有超过40GW的装机容量增长。由于火力发电将在未来电力资源中占主导地位,引进和建设低煤耗、大容量的超超临界火电机组势在必行,且已全面展开。

一、国外超超临界机组的发展概况

1. 超超临界机组蒸汽参数的发展概况

世界上第一台实验性的超临界锅炉是西门子公司根据捷克人马克·本生1919年的专利方案制造的,后来世界各发达国家竞相研究和生产超超临界机组。超超临界机组蒸汽参数经历高一低一高的过程,并不是按部就班由22.2MPa/538℃/538℃向上发展的。

1949年,原苏联安装了第一台超超临界直流锅炉试验机组,锅炉出口蒸汽参数为29.4MPa/600℃(12t/h),以后作为改造中压机组的前置级,又生产了29.4MPa/650℃的100MW机组。

1956年,西德投运了1台参数为34MPa/610℃、容量为88MW的机组。

欧洲在1995~1999年间至少投运了9台蒸汽压力为28.5~31.0MPa、温度为545~587℃的超超临界机组,并将蒸汽温度提高至600℃以上。其中丹麦诺加兰德火电厂3号机组是一台超超临界燃煤供热机组,采用了超超临界蒸汽参数、二次再热,参数为29MPa/580℃/580℃/580℃。该机组的锅炉能适用多种煤种,能带中间负荷,热效率可达47%~49%。

美国于20世纪50年代末投运了2台具有代表性的超超临界机组,菲罗电厂6号机组,容量为125MW、参数为31MPa/621℃;费城电力公司的艾迪斯顿电站参数为34.3MPa/649℃,容量为325MW。艾迪斯顿1号机从1960年开始按设计参数运行了8年,后因出现故障而停运。故障原因是蒸汽参数过高超越了当时的技术水平,特别是材料无法满足蒸汽参数的需求。由于试制的高参数超超临界机组频繁发生事故,不得不降低参数运行,美国自1968年起将参数降至24.1MPa/538~566℃,这种蒸汽参数保持了20多年。

日本则引进了美国的技术并结合欧洲的适合变压运行的本生式直流炉,成功地开发出自己的超超临界机组。1989年和1991年,川越电厂投运2台700MW的31MPa/566℃的机组,运行情况良好,可用率水平很高。川越电厂1、2号机组是世界上第一台采用超超临界压力、二级再热系统的超超临界机组,参数为31MPa/566℃/566℃/566℃,热效率在发电端达到41.9%。1998年,日本投运的主蒸汽和再热蒸汽温度均为600℃的1000MW机组,实测发电机端效率达44.7%。

随着科学技术的不断发展,2005年,超超临界机组的蒸汽参数达到了33.5MPa/630℃,预期到2015年可达40.0MPa/720℃。随着参数的提高,对材料的要求、产品开发的技术难度和机组的造价也越来越高。

2. 超超临界机组单机容量的发展情况

目前,国际上已经投运的单机容量为800MW以上火电机组的国家主要有美国、日本、原苏联和德国等。20世纪60年代,大容量机组出现了飞速发展,美国首台燃油、亚临界1000MW机组于1965年在Ravens Wood电厂投运。进入70年代后,由于燃料发生变化,影响了机组可用率,加上大容量火电机组不适应调峰等因素,其发展趋于停滞,机组设计趋于保守,主力机组变为500~800MW。大容量机组多由Alstom Power, Inc. USA(原美国燃烧工程公司)设计制造。1976年和1978年,Alstom为美国旺斯利(Wansley)电站设计并制造的两台952MW超临界锅炉成功地投入运行。1991年至2001年,美国ALSTOM共设计制造了28台500~800MW的超临界锅炉。

原苏联发电机组的发展按国家计划进行,机组容量统一规定为500、800、1200MW,锅炉出口蒸汽压力为25MPa,蒸汽温度最初为565℃/570℃,后因材料原因降至545℃/545℃。首台800MW机组1967年于斯拉维斯克电厂投运。由于1200MW机组与800MW机组相比,经济性没有明显优势,而可靠性有待提高,再加上社会和电网原因,因此1200MW及以上机组没有再建造。

韩国Yonghung目前正在建的超临界电厂是两台800MW机组,采用了滑压、螺旋水冷壁技术,过热器出口压力为25MPa,过热器出口温度为569℃,再热器出口温度为569℃。

日本三菱重工株式会社(MHI)作为全球著名的发电设备和重型机械制造公司之一,在开发超临界和超超临界技术方面走在世界的前列,到目前为止,投运的容量大于500MW的超临界和超超临界锅炉已达60台。

3. 超超临界机组材料的发展概况

超超临界锅炉由于温度及压力的提高,对主要部件的抗蠕变、疲劳、高温氧化与腐蚀性能等都提出了更苛刻的要求。目前超超临界锅炉主要部件的制造中,除选用亚临界锅炉常规选用的SA-335P91(SA-213T91)、SA-213TP304H、SA-213TP347H等材料外,还选用了一些高温蠕变性能、高温抗氧化性能更好的新型材料,如SA-335P92(SA-213T92)(9Cr-2W)、SA-335P122(SA-213T122)(12Cr-2W)等新型马氏体钢和Super304H(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N)、SA-213TP347HFG(18Cr-10Ni-Nb)、SA-213TP310HCbN(25Cr-20Ni-Nb-N)、XA704(18Cr-9Ni-2.5W-NbVWN)、Tempaloy A-1(18Cr-8Ni-Nb-Ti)、TEMPALOY AA-1(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-Ti)、TEMPALOY A-3(22Cr-15Ni-Nb-N)等新型奥氏体钢。

日本川越电厂锅炉过热器出口集箱和主蒸汽管一直采用SA-335P91和SA-182F91新材料,过热器管采用具有足够抗水蒸气氧化特性的SA-213TP347H细晶粒钢管,超高温高压阀采用了高温强度性能好的SA-182F91材料,带中间负荷时运行情况良好,且热效率一直很高。20世纪90年代初,日本住友金属工业株式会社开发研制了Super304H(18Cr-9Ni-3Cu-Nb)钢和HR3C(25Cr-20Ni-Nb)等一系列适合超(超)临界锅炉的过热器和再热器用钢。该类钢在600~700℃的许用应力比SA-213TP347H高20%以上,具有良好的耐蒸汽氧化性和良好的可焊性。Super304H钢具有更精细的晶粒尺寸,耐蒸汽氧化性与具有极细晶粒尺寸的SA-213TP347HFG大致相同,比SA-213TP321H或SA-213TP316H优越。

HR3C 是在 TP310H 钢基础上开发研制出的新钢种, 含 Cr、Ni 量比 Super304H 高, 在 650~700℃ 时的抗高温蒸汽氧化腐蚀能力比 Super304H 强, 650℃ 高温蠕变强度比 SA-213TP347H 高近 50%。SA-335P92 (9Cr-1.8W) 钢是在 9Cr 钢的基础上添加了 1.8% 的钨, E911 (9Cr-1Mo-1W) 钢是在 P91 钢的基础上添加了 1.0% 的钨, 因为钨能提高高温强度和蠕变断裂强度, 此类材料在 600~650℃ 时的高温蠕变强度比 P91 高很多, 但也使焊缝金属形成过剩的 δ -铁素体, 降低焊缝机械性能。SA-376TP347H 钢是适用于高温中央电站用无缝奥氏体钢管, 它在 600~700℃ 时的高温蠕变强度和耐蒸汽氧化性能比 P92 要高, 可不预热焊接。

丹麦诺加兰德火电厂水冷壁和锅炉的上部通道选用 13CrMo44 材料 (该材料不会在水冷壁的焊接处产生应力释放); 540℃ 以上的过热器管道使用 SA213TP347H 奥氏体合金钢, 能耐蒸汽氧化和高温腐蚀; 高温区的联箱和连接管采用马氏体钢。

二、中国超(超)临界机组发展概况

超超临界燃煤发电机组煤耗低、环保性能好、技术含量高, 是国际上燃煤发电机组的重要发展方向。从我国国情出发, 发展超超临界机组, 有利于降低我国平均供电煤耗, 有利于电网调峰的稳定性和经济性, 有利于保持生态环境、提高环保水平, 有利于实现技术跨越、创建国际一流的火力发电厂。我国从事直流锅炉制造的厂家主要有上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂和东方电气集团公司。

上海锅炉厂有限公司在发展直流炉技术(含超超临界)方面可分为三个阶段: 20 世纪 60~80 年代是公司自行研究开发直流锅炉的第一阶段; 80~90 年代是引进国外先进技术的第二阶段; 2000 年以后为自行开发设计并对外转让技术阶段。

1981, 上海锅炉厂年开始引进美国燃烧工程(CE)公司配 300MW 和 600MW 的亚临界控制循环锅炉的成套设计和制造技术; 1987 年, 部分引进瑞士 Sulzer 公司 600MW 超临界压力锅炉技术; 1999 年引进德国斯坦缪勒公司的亚临界螺旋管圈技术等。20 世纪 80 年代末, 上海锅炉厂与 ABB-CE 公司合作制造石洞口二厂 2×600MW 超临界压力直流炉项目; 1998 年, 开始承接与 ALSTOM 合作制造外高桥 2×900MW 超临界锅炉项目。2000 年后, 上海锅炉厂与国外公司合作进行超临界锅炉设计并准备转让超(超)临界锅炉技术。2003 年, 上海锅炉厂正式引进了美国 ALSTOM 公司(原美国 CE 公司)600~1000MW 超(超)临界压力锅炉成套设计和制造技术。引进超(超)临界压力锅炉技术的主要内容包括变压运行的螺旋管圈技术及垂直管圈技术, 蒸汽参数为压力 25~36.5MPa, 温度为 (538~654)/(538~600)℃。该技术目前居于国际领先地位, 世界上只有 ALSTOM 和三菱公司在 800MW 以上机组采用垂直管圈技术。到目前为止, 上海锅炉厂先后承接了 28 台 600MW 超临界压力锅炉的制造。

哈尔滨锅炉厂近年来承担了“十五”国家重点科技攻关计划项目(国家 863 计划), 针对“超超临界燃煤发电技术”、“超超临界发电机组技术选型研究”开展了超超临界燃煤锅炉选型的研究工作。

国家重点工程华能玉环电厂 1 号机组是我国首台 1000MW 超超临界机组, 于 2006 年 11 月 28 日已顺利完成 168h 投运正式投入商业运行。

华电国际邹县发电厂四期工程扩建两台百万千瓦级超超临界机组, 是国内首批百万千瓦等级火电机组, 也是国内单机容量最大、运行参数最高的燃煤发电机组。它引进并采用国外

先进技术，三大主机由东方电气集团公司制造，是国家引进技术国产化的依托工程。该工程 7 号机组已于 2006 年 12 月 4 日建成投产，8 号机组将于 2007 年 7 月底建成投产，届时华电国际邹县发电厂装机容量将达到 4540MW，成为全国最大的火力发电厂，成为国内综合节能和环保水平最高的燃煤电厂之一。

现在国内已投产多台 600、800、900MW 级超临界压力燃煤机组，近期又有 18 台 1000MW 的机组（华能玉环电厂 4 台、华电国际邹县电厂 2 台、外高桥电厂三期 2 台、泰州电厂 2 台、宁海电厂 2 台、绥中电厂 2 台、天津北疆电厂 4 台）处于投产和在建中。上海外高桥电厂二期 5 号机组，我国第一台 900MW 超临界燃煤发电机组，比原计划提前 71 天顺利通过连续 168h 满负荷试验。该机组正式投入商业运行标志着我国电力工业又跃上了一个新台阶。

虽然我国超超临界锅炉的制造起步较晚，但发展迅速，主要涉及到的新材料有 SA-335P92(SA-213T92)、SA-335P122(SA-213T122)、Super304H(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N)、SA-213TP310HCbN(25Cr-20Ni-Nb-N)等。

三、超超临界机组关键技术问题

超超临界压力锅炉的关键技术是多方面的，如材料的选择、水冷壁系统及其水动力安全性、受热面布置、二次再热系统汽温的调控等。

1. 材料

热强度性能高、工艺性好、价格低廉的高温受热面材料开发是超超临界机组发展最关键的问题。早期的超超临界锅炉使用了大量的奥氏体钢。与铁素体钢相比，奥氏体钢具有更高的热强性，但成本高、热膨胀系数大、导热性小，抗应力腐蚀能力低、工艺性差，热疲劳和低周疲劳性能（特别是厚壁件）也差。因此，出现了许多奥氏体钢制部件损伤事故。随着超临界直流锅炉向着高效、节能方向发展，锅炉部件的过热器和再热器材料也向高强度、高耐蚀性的新型耐热钢和奥氏体合金钢发展。虽然 550~625℃铁素体耐热钢的成功开发降低了超超临界机组造价，但是由于蒸汽参数提高，高温部件的工作环境更为恶劣。因此，必须采用更高级的材料来满足要求。目前，在 600~700℃工作温度下，可选用钢种有 HR3C、Super304H、SA-213TP347HFG、SA-335P92、SA-376TP347H 等。

2. 水冷壁

超超临界压力锅炉的水冷壁系统，主要为螺旋管圈水冷壁和由内螺纹管组成的垂直管圈形式水冷壁两种。

螺旋管圈水冷壁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并保证水冷壁安全的质量流速。螺旋管圈中的每根管子均同样地绕过炉膛和各个壁面，每根管子的吸热量相同，管间的热偏差最小，适用于变压运行，但是螺旋管圈的制造、安装、支承等工艺较为复杂，且流动阻力大。内螺纹管组成的垂直管圈水冷壁受炉膛沿周界热负荷偏差的影响较大，除了需要采取一定的结构措施（例如加装节流装置）使管内工质流量的分配与管外热负荷的分布相适应外，还要求较高的运行操作水平和自动控制水平。

开发超超临界压力机组，有必要在现有的超临界压力水冷壁内沸腾传热研究的基础上，扩展实验研究的压力范围，防止膜态沸腾现象，确保水冷壁系统工作的安全性。

3. 二次再热系统

在设计二次再热锅炉时，必须根据基本负荷下的高效率运行来决定最佳的再热器受热面

布置和再热蒸汽温度控制方法。

超超临界压力锅炉若采用二次中间再热系统，蒸汽温度的控制要比一次再热机组复杂得多。原则上各种调温手段都可以进行再热温度的调节，但必须考虑机组在部分负荷时，再热蒸汽温度必须具备能够确保设计蒸汽温度值，即负荷变化时，再热蒸汽温度针对设计变化率必须稳定这一特点，另外，还需考虑保证机组效率、减少厂用电等问题。

4. 自动控制

超临界锅炉与亚临界汽包锅炉在自动控制方面的不同，实质是直流锅炉与汽包锅炉之间的差别，直流炉与汽包炉在运行原理及特性上有较大差别。在汽包锅炉中，给水流量的变化仅仅影响汽包水位，燃料量变化则仅仅改变蒸汽压力和流量，因此锅炉给水量、燃料量、汽温控制等都是相对独立的，即：给水→水位；燃料→产汽量及汽压；喷水→汽温。直流锅炉中没有汽包，蒸发与过热受热面之间没有固定的分界线，给水量或燃料量变化都会引起蒸发量、汽温和汽压的同步变化，相互有牵制，关系密切，这给控制系统的设计和调整增加了灵活性，也增添了复杂性。随着超临界机组蒸汽压力的升高，直流锅炉中间点汽温（通常取启动分离器出口汽温）和过热器出口汽温控制点的温度变动惯性增加（亦即比热容增加），时间常数和延迟时间相应增大，在燃料或给水量扰动时，超临界锅炉蒸汽温度变化具有更大惯性。因此，在超临界机组启动和低负荷（小于最低直流负荷）运行期间，必须投入启动系统，增加了锅炉启动系统对控制的要求。

与亚临界锅炉相比，超临界锅炉运行情况更加复杂，难于控制。在规定的运行工况下，必须维持某些比例常数；在变工况下，则必须使这些比例按一定规律变化；在启动和低负荷时，要求更大幅度地改变这些比例，以得到宽范围领域的自动控制。为解决这个问题，自控设计人员必须设计更完善的闭环控制系统，在启动工况更多地采用变参数变定值技术；所有控制功能应在前馈技术的基础上完成，并连续地校正控制系统的增益；在软件设计中，将直流锅炉特点量化并加以贯彻。

第二节 大型超（超）临界压力锅炉的选型

随着超临界压力燃煤机组占国内装机容量的比重越来越大，如发生事故，将严重威胁电网安全。为确保电力安全生产，根据影响超临界压力机组可用率的最主要因素，科学合理地选择锅炉形式和设计参数成为引进吸收国外先进技术成败的关键。

一、大型超临界压力锅炉特点

超临界压力锅炉由于参数本身的特点只能采用直流锅炉。在超临界压力下，工质状态由水变成过热蒸汽时不存在汽水两相区，因此超临界压力直流锅炉无需设计汽包，启停速度快。与一般亚临界压力汽包炉相比，超临界压力直流锅炉从启动到满负荷运行，其变负荷速度可提高1倍左右。但是变压运行的超临界压力直流锅炉在亚临界压力范围内和超临界压力范围内工作时，存在工质的热膨胀现象：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。

超临界压力直流锅炉水冷壁的流动阻力全部依靠给水泵克服，所需的压头高，这提高了制造成本又增加了运行耗电量，且直流锅炉普遍存在着流动不稳定、热偏差和脉动等水动力问题。

为达到较高的质量流速，超临界压力直流锅炉必须采用小管径水冷壁。虽然和相同容量的自然循环锅炉相比，本体金属耗量最少，锅炉质量轻，但由于蒸汽参数高，要求的金属等级高，其成本高于自然循环锅炉。

超临界直流锅炉要求的汽水品质高，凝结水需进行 100%除盐处理。

超临界压力锅炉机组单台机组发电效率最高可达 50%，煤耗最低仅为 255g/(kW·h) (丹麦 BWE 公司)，较亚临界压力机组[煤耗最低为 327g/(kW·h)左右]煤耗低。

二、大型超临界压力锅炉受热面管型

现代直流锅炉受热面形式主要有一次垂直上升管屏、多次垂直上升和下降管屏、螺旋围绕上升管屏和垂直内螺纹管管屏四种形式。实践证明，一次垂直上升管屏和多次垂直上升与下降管屏这两种形式大多应用于带基本负荷的机组，采用这种形式受热面的锅炉不适宜滑压运行，且与我国厂网分离竞价上网的基本政策不相符，引进的价值不大。螺旋围绕上升管屏和垂直内螺纹管屏则比较适合作为调峰机组，下面针对这两种水冷壁进行分析。

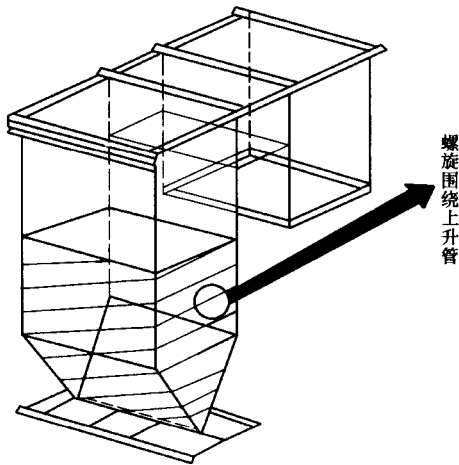


图 1-1 螺旋围绕上升管屏水冷壁

螺旋围绕上升管屏水冷壁是德国、瑞士等国为适应变负荷运行的需要而研发的。水冷壁管沿锅炉内壁四周倾斜上升（见图 1-1），水平管屏吸热较均匀，可不设置中间混合联箱。这种水冷壁滑压运行时也没有汽水混合不均的问题，所以能变压运行、快速启停，能适应电网负荷的频繁变化，调频性能好。另外，螺旋管圈适宜采用膜式水冷壁，热偏差小，工质流速高、水动力特性较稳定，不易出现膜态沸腾，又可防止产生偏高的金属壁温，且管子数目可按设计要求选取，不受炉膛大小的影响，也可选取较粗管径以增加水冷壁刚度。这种管型对煤种适应性强，可燃用挥发分低、灰分高的煤。但是，由于这些环绕炉膛的管子把炉膛包裹起来而形成炉墙，因此螺旋布置管屏的加工与安装更加复杂，而且费用高。

由于受热面支吊方面水平管圈承受荷重的能力较差，考虑到炉膛上部的热负荷已经降低，管壁之间温差不大，采用垂直管屏也不会造成膜式水冷壁的破坏，有的锅炉采用简单易行的全悬吊结构，把螺旋围绕上升管屏水冷壁上部设计成全悬吊垂直上升管屏。螺旋管圈水冷壁是目前较流行的一种形式，也是超临界压力锅炉发展的一个方向，被国内超临界压力机组采用较多，也被我国引进的第一台超临界压力机组华能石洞口电厂的锅炉采用，已积累了丰富经验，可大范围推广引进。

垂直内螺纹管管屏形式是日本三菱公司和美国 CE 公司合作研究的一种炉型，在日本已有三菱公司和美国 CE 公司合作研发的 4 台 700MW 和 3 台 1000MW 超临界压力机组在运行中取得了成功经验。内螺纹管具有良好的传热和流动特性，内螺纹表面的槽道可破坏蒸汽膜的形成，在较高的含汽率状态下也难以形成膜态沸腾，而是维持核态沸腾，从而可以抑制金属温度的升高，特别是在锅炉低负荷时可抑制得很低。内螺纹管水冷壁在滑压运行时没有汽水混合物分配不均的问题，适用于滑压运行，能实现高负荷变化率和快速启停运行。内螺纹管水冷壁采用膜式水冷壁，各管壁之间温差小，避免了传热不均；流动阻力少，可节省输送

动力；燃煤机组灰渣易于脱落，使炉膛水冷壁积灰渣减少；炉型设计结构简单（见图 1-2），炉膛易于支吊，安装工作和焊接工作量少，可靠性高，便于检修。

垂直内螺纹管水冷壁形式和螺旋围绕上升管屏水冷壁相比，具有明显的优势，代表了一个全新的发展方向，见表 1-1。

表 1-1 螺旋围绕上升管圈锅炉与垂直内螺纹管锅炉比较

比较项目	比 较 结 果
锅炉性能	垂直内螺纹管锅炉在部分负荷时（亚临界压力区域）的蒸发管壁温度低
运行动力	垂直内螺纹管锅炉炉膛蒸发管压力损失少，运行能耗小
运行特性	相同
锅炉结构	螺旋围绕上升管圈锅炉炉膛支撑结构为拉伸紧固支撑型，而垂直内螺纹管锅炉与传统型锅炉相同，蒸发管为自身支撑
炉室尺寸	相同
锅炉基础载荷	相同
现场安装	垂直内螺纹管锅炉的现场焊接部位少，安装工作量少
维护保养	垂直内螺纹管锅炉维护保养方便

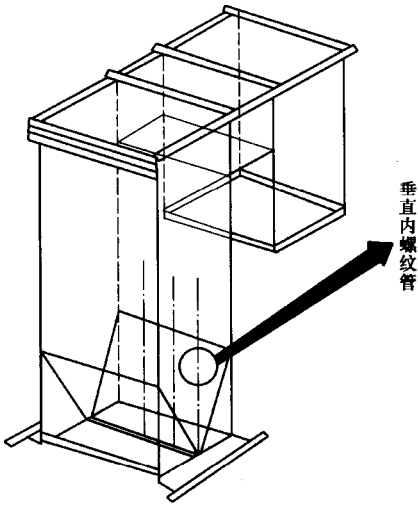


图 1-2 一次上升垂直内螺纹管屏

随着科学技术的不断发展，西门子 KWU 公司和 B&W 公司一起研究发展了优化多通道内螺纹管。该管能用一般的挤压方法加工制造，它的内螺纹高度高、螺距小，从而使得管内工质的混合与紊流加强、冷却效果明显优于单通道和传统的多通道内螺纹管的冷却效果，可确保锅炉安全可靠运行，并且加工方法更简单，成本更低廉，因此我国在引进超临界机组技术时可优先予以考虑。

三、大型超临界压力锅炉受热面和管道及联箱金属材料

高参数大型火电机组直流锅炉是否科学合理地选择了主要设备材料是确保机组安全运行的主要因素之一。

提高蠕变强度、消除或减小热疲劳影响对于管道和联箱的壁厚部分是一个主要问题，因此合金的应用发展集中在包含 9%~12%Cr 的铁素体钢。三种优化后的 9%~12%Cr 铁素体钢为新型合金钢 HCM12A、NF616 和 E911（又称 P92、P122 和 E911），可提高蒸汽参数到 34MPa/620℃。超过 620℃时，9%Cr 钢的抗氧化能力是一个附加限制因素；含有 Cr 和更多 W 的 12%Cr 新型合金 NF12 和 SAVE12，可在 650℃应用；当温度超过 650℃时，则需要奥氏体钢和镍基合金。

锅炉过热器和再热器（SH/RH）管子的蒸汽侧氧化和烟气侧抗腐蚀力也是应考虑的主要问题。因为管壁金属实际温度通常超过蒸汽温度约 28℃，所以任何一种铁素体钢不太可能在蒸汽温度为 565℃的过热器/再热器管子末段使用，在这些较高的温度下，需要用奥氏体钢。煤的腐蚀性要求采用较高含量的 Cr 钢或在管外设包覆层，对于 620℃的过热器和再热器管子，在非腐蚀的情况下，推荐使用 Super304H、TempaloyA-1、Esshete 1250、17CW-Mo；腐蚀较严重时，则推荐 20%~25%Cr 的合金，如 HR3C、NF709 及 IN72 覆层；