

超超临界火电机组丛书

汽轮机设备与运行

张 磊 马明礼 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

汽轮机设备与运行

张磊 马明礼 主编

- [1] 田金玉, 火力发电厂, 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [12] 代运修, 张旭, 600MW火电机组汽轮机运行, 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] 李国英等, 发电, 40, 2004, 10, 100-101.
- [14] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [15] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [16] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [17] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [18] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [19] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [20] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [21] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [22] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [23] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [24] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [25] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.
- [26] 王平, 超超临界火电机组的汽轮机设备与运行特点, 上海电力, 2004, 10, 100-101.

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编

张磊 马明礼 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内容提要

本书是《超超临界火发电机组丛书》之一。

本书是以山东省邹县发电厂四期工程 $2 \times 1000\text{MW}$ 超超临界机组的汽轮机的实践经验为基础编写的。全书共十一章,分别阐述了 1000MW 汽轮机的发展过程、国内三大汽轮机制造厂生产的 1000MW 汽轮机的主要技术参数及整体概况、汽轮机材料焊接、汽轮机结构;详细讨论了与汽轮机有关的设备及系统,如凝汽设备及其系统、汽轮机调节保护及供油系统、氢冷发电机氢油水系统、给水回热加热系统等;最后论述了 1000MW 汽轮机的运行知识。

本书可供 1000MW 火力发电机组汽轮机运行、检修人员培训使用,也可供 1000MW 火力发电机组设计、制造、安装技术人员和大中专院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备与运行/张磊,马明礼主编. —北京:中国电力出版社,2008

(超超临界火发电机组丛书)

ISBN 978-7-5083-6330-1

I. 汽… II. ①张…②马… III. 火电厂-蒸汽透平
IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 187492 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米 $\times$ 1092 毫米 16 开本 29.75 印张 732 千字 1 插页

印数 0001—3000 册 定价 60.00 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	兰圣增	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。

本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 (×10 ⁶ 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 2×1000MW 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的总容量将达到 4540MW,而邹县发电厂将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》四个分册。《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

本书由山东省电力学校与华电国际邹县发电厂合作编写完成,是《超超临界火电机组丛书》之一。本书主要以国内已运行的邹县发电厂四期 $2 \times 1000\text{MW}$ 超超临界机组汽轮机设备及其系统的结构特点、原理、功能及性能为编撰重点,突出 1000MW 汽轮机设备及其系统的技术特点。

本书是以山东省邹县发电厂四期工程 $2 \times 1000\text{MW}$ 超超临界机组的汽轮机的实践经验为基础编写的。全书共十一章,分别阐述了 1000MW 汽轮机的发展过程、国内三大汽轮机制造厂生产的 1000MW 汽轮机的主要技术参数及整体概况、汽轮机材料焊接、汽轮机结构;详细讨论了与汽轮机有关的设备及系统,如凝汽设备及其系统、汽轮机调节保护及供油系统、氢冷发电机氢油水系统、给水回热加热系统等;最后论述了 1000MW 汽轮机的运行知识。

山东省电力学校张磊和马明礼为本书主编,刘红蕾为本书副主编。华电国际邹县发电厂张新春和山东省电力学校代云修担任本书主审。第一、二、十一章由张磊编写;第三章由兰圣增编写;第四章的第一节和第五章由马明礼编写;第四章的第二、三节,第六章的第六节,第九章由廉根宽编写;第六章的第一节至第五节由周长龙编写;第七章和第十章及第八章第一~四节由刘红蕾编写;第八章第五节和第六节由邹县发电厂张伟和陈炜编写。

限于编者水平,加之时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2007年10月

前言

2008年10月

目录

序	1
前言	1
本书前言	1
第一章 绪论	1
第一节 超超临界机组参数和热力系统的优化分析	1
第二节 超超临界机组的选型	11
第二章 1000MW 汽轮机简介	20
第一节 超超临界汽轮机技术特点	20
第二节 东方汽轮机厂 1000MW 汽轮机介绍	29
第三节 上海汽轮机厂 1000MW 汽轮机设备及系统介绍	53
第四节 哈尔滨汽轮机厂 1000MW 汽轮机介绍	76
第三章 汽轮机本体	103
第一节 汽轮机转子及叶片	103
第二节 汽缸	112
第三节 轴承	121
第四节 主汽门、调节汽阀、中压联合汽门	129
第五节 盘车装置	131
第四章 汽轮机主要辅助设备	132
第一节 回热加热器	132
第二节 凝汽设备	153
第三节 除氧器	178
第五章 发电厂热力系统	188
第一节 热力系统概述	188
第二节 主蒸汽管道系统	192
第三节 再热机组旁路系统	198
第四节 回热抽汽系统	211
第五节 主凝结水系统	216
第六节 给水除氧系统	221
第七节 汽轮机的轴封蒸汽系统	226
第八节 发电厂疏放水系统	230
第六章 汽轮机调节、保护及供油系统	237
第一节 汽轮机调节系统概述	237

第二节	DEH 控制系统工作原理	245
第三节	DEH 控制系统主要功能	251
第四节	DEH 控制系统的主要配置	256
第五节	汽轮机的调节保安系统	271
第六节	汽轮机的供油系统	279
第七章	管道与阀门	294
第八章	火电厂主要水泵	314
第一节	给水泵组	314
第二节	1000MW 机组的液力耦合器	333
第三节	循环水泵组	342
第四节	凝结水泵	350
第五节	真空泵	356
第六节	发电厂其他常用泵	360
第九章	汽轮机材料	370
第一节	汽轮机材料发展	370
第二节	超超临界 (USC) 汽轮机部件材料	373
第三节	超 (超) 临界机组 P92 钢材的焊接工艺评定	381
第十章	汽轮机叶片超声波检验与侵蚀现象	396
第一节	汽轮机叶片超声波检验技术	396
第二节	汽轮机叶片固体颗粒侵蚀现象	403
第十一章	1000MW 汽轮机运行	414
第一节	汽轮机辅助设备的启停	415
第二节	汽轮机本体设备的启停	429
第三节	机组运行维护	440
第四节	机组连锁保护及试验	448
第五节	机组事故处理	453
参考文献		465

第一章 绪 论

超超临界机组的热效率高,与常规的超临界机组相比较,至少可节约燃料4%~5%。运行实践也表明,超超临界机组的变压运行方式能较好地满足调峰的要求。新一代大容量超超临界燃煤机组已具备了优良的经济、环保和启动调峰运行性能,并在低负荷时仍然保持较高的效率。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。与同容量亚临界火电机组相比,超临界机组可提高效率2%~2.5%,超超临界机组可提高效率约5%。火力发电机组采用大容量超超临界参数燃煤机组是降低发电煤耗的主要途径之一。

我国近期18台1000MW的机组(玉环4台、邹县2台、上海外高桥三期2台、泰州2台、宁海2台、绥中2台、天津北疆4台)处于投产发电和在建中。超临界压力燃煤机组占国内装机容量的比重越来越大,由于超临界压力燃煤机组的单机容量较大(600~1300MW)的原因,因此如发生事故,将严重威胁电网安全。

随着世界电力设备制造技术水平的发展,火力发电机组的容量也在不断提高,机组的单机容量由600MW提高到900~1000MW,机组的蒸汽参数由亚临界压力也随之提高到超临界压力和超超临界压力,汽轮机进口处的蒸汽压力由亚临界压力的16.7MPa提高到超临界压力的24~25MPa,甚至提高到超超临界压力的30MPa以上;汽轮机进口主蒸汽温度、再热蒸汽温度由538~545℃提高566℃,甚至达600~610℃。

为了适应世界电力工业的发展,我国在引进国外超临界机组及其设计制造技术的基础上,开始超临界机组的国产化研制,并同时进行超超临界机组的示范工程建设。在进行超临界和超超临界机组相关技术攻关研究的同时,应高度重视我国现行的技术规范、标准与超临界和超超临界机组的同步发展。目前,我国主要有哈尔滨汽轮机制造厂、上海汽轮机制造厂和东方汽轮机制造厂。从容量等级来说,国产超临界机组从600MW起步,更大容量考虑采用1000MW等级,对1000MW机组选用单轴方案在技术上是可行的,并有利于降低机组造价。采用超超临界机组是当今世界火电机组发展的一个新动向。这三大汽轮机制造厂目前正在分别和三菱公司、西门子公司、日立公司等联合设计制造1000MW超临界及超超临界机组。

超超临界火电机组研制的技术难点和关键技术集中在锅炉、汽轮机、汽轮发电机部件强度研究以及机组高参数、大型化后的各大主机、辅机的结构设计,高温材料和铸锻件的技术开发等方面。汽轮机参数提高、容量增大后,为获得高效率、高可靠性的汽轮机,着重要进行的开发研究是:汽轮机结构配置、关键部件的结构设计、高温部件冷却、叶片抗固体颗粒的侵蚀与叶片喷涂技术、汽轮发电机组转子动力学特性等。

第一节 超超临界机组参数和热力系统的优化分析

一、超超临界机组的发展

新材料的开发始终是超超临界技术发展的关键。20世纪50年代已具有生产蒸汽参数达

600~650℃机组的材料,但材料技术并不成熟,且价格昂贵,影响了超超临界机组的可靠性,因而不得不降低温度参数。但是,由于全球性的节约能源和环境保护的原因,在此期间,超超临界技术发展的研究一直在进行,重点解决的是高温高强度材料的开发。直到20世纪80年代研究出适用于600~650℃蒸汽参数的9%~12%Cr钢,成本远低于最初用的奥氏体钢和高温合金,且其物理性能与工艺性能都比奥氏体钢优越,给再度生产蒸汽参数为600~650℃的机组创造了条件。20世纪90年代初又开始制造超超临界参数机组。目前,国外已形成600℃等级的9%~12%Cr钢的材料标准系列,新型高温铁素体—马氏体9%~12%Cr材料已用于31MPa/600℃/610℃参数的超超临界机组,经过汽轮机各高温高压部件近十多年的应用,这种材料技术已经相当成熟。600℃等级的超超临界机组也已经大批量生产和投运,价格越来越具有竞争力。

20世纪80年代,欧洲以英国为中心进行了COST501项目,研制600℃级的珠光体钢。1998年,欧洲16个国家参加了COST522项目,启动了对650℃级超超临界机组珠光体材料的开发工作,该项目于2003年结束。日本1981~2000年在通产省的支持下实施了珠光体钢和奥氏体钢材料的研究计划,第一阶段将汽轮机的进汽参数提高到31.1MPa/593℃/593℃/593℃和34.3MPa/649℃/593℃/593℃,发电机端效率为44.2%~44.9%。第二阶段将汽轮机进汽参数提高到30MPa/630℃/630℃,发电机端效率达到44.16%。

欧盟从1998年还启动了计划长达17年的700℃等级超超临界参数的开发项目“AD700计划”。该计划的目标是开发先进蒸汽参数的超超临界火电机组,将供电效率提高到55%(深海水冷却)或52%(内陆电厂),并且使厂房结构更加紧凑,降低燃煤电厂的投资。“AD700计划”的核心技术是通过镍基超级合金材料的开发和应用,使汽轮机的主蒸汽温度由目前的600℃提高到700℃。同时,为了在将来的超超临界机组中减少使用价格昂贵的镍基超级合金,还确立了相同温度等级奥氏体钢和铁素体钢的发展计划。“AD700计划”的战略意义是使欧盟成员国燃煤火电机组的技术水平始终处于世界领先水平,因为欧盟各成员国拥有大量的亚临界机组,到2010年运行寿命接近40年,如果采用700℃等级的超超临界机组替换老机组,可明显提高热效率。另外,欧盟各成员国已批准了《联合国气候变化框架公约》京都议定书,大规模采用高效率的超超临界机组可以使CO₂的减排满足“京都议定书”的要求。上述研究计划虽然还没有如期实现,但正在向目标前进,在超超临界机组的参数选择、机组设计制造以及运行方面已经取得了阶段性的成果。

由于世界发达国家用电量已趋于饱和,在新建机组中采用这种高效机组所占的比例就相当高。世界近十年来大容量超超临界机组投运或订购情况的统计分析结果表明,随着9%~12%Cr钢研制成功,各大发电设备制造商正在迅速发展温度参数为600℃的机组。从总体情况分析,目前新建超超临界火电机组主要集中在日本和欧洲市场,汽轮机主蒸汽温度和再热蒸汽温度已普遍达到600℃。根据日本新建电厂的统计,自1998年以来,所有新建的超超临界机组均已采用600℃等级的温度参数,整体技术已相当成熟。对于主蒸汽压力,日本自1990年以来投运的机组进汽压力均为25MPa左右。1998年后,西门子相继有25.8~30MPa的机组投运,但目前功率大于700MW机组的进汽压力均不大于26.5MPa,且均为一次再热。20世纪90年代以来,国外尚没有超过27MPa压力的百万千瓦级汽轮发电机组的设计和投运的报道。在机组容量方面,500~700MW容量等级的机组占有相当比例,原来由于发电机最大输出功率的限制,以前日本单轴机组功率不超过700MW,而对于百万千

瓦级超超临界机组，均采用双轴形式。随着技术的发展，日本各制造厂单轴机组功率也开始突破 700MW，由东芝制造的第一台 1000MW 单轴机组已经在 2002 年 11 月投运。德国西门子公司自 20 世纪 90 年代后期也有多台 900~1025MW 单轴机组投运。表 1-1 列出了国外近期投运的典型超超临界火电机组，从表中可以看出，超超临界机组正显现出 21 世纪火电技术具有代表性的发展潮流。

表 1-1 国外近期投运的典型超超临界火电机组

参数 (MPa/℃/℃)	功率 (MW)	制造商	电 厂	投运年份
31/566/566/566	700	东 芝	川越 2 号	1990
25/600/610	1050	东芝、GE	橘湾 1 号	2000
24.1/593/593	700	东 芝	敦贺 2 号	2000
24.1/566/593	1000	东 芝	碧南 4 号	2002
24.1/593/593	700	东 芝	苓北 2 号	2003
24.1/538/593	700	三 菱	碧南 3 号	1993
24.5/600/600	1000	三 菱	三隅 1 号	1998
24.5/600/600	600	三 菱	广野 5 号	2004
24.5/595/595	900	三 菱	舞鹤 1 号	2004
24.1/566/593	600	日 立	能代 2 号	1994
24.5/600/600	1000	日 立	原町 2 号	1998
25/600/600	700	日 立	占东厚真 4 号	2002
24.5/600/600	1000	日 立	常陆那珂 1 号	2003
25/600/610	600	富 士	孔子 1 号	2002
29/582/580/580	415	GEC-ALSTOM	丹麦 ELSAM	1998
28.5/580/580/580	414	GEC-ALSTOM	NORDIYLLANDVA	1998
25.8/541/578	915	KWU	BOXBERG BLOCK	1999
30/580/600	375	KWU	AVEDOERE, 2	1999
25.1/600/600	600	KWU	ISOGO	2002
26.5/576/600	1025	KWU	NIEDERAUSSEM	2002
25/575/595	750	KWU	BEXBACH, II	2002

1. 美国

美国是发展超临界机组最早的国家，世界上第一台超临界机组于 1957 年在 Philo 电厂（6 号）投运，容量为 125MW，参数为 31MPa/621℃/566℃/560℃，该机组由 B&W 和 GE 公司设计制造；1958 年，第二台超临界机组在 Eddystone 电厂（1 号）投运，容量为 325MW，机组的参数为 34.4MPa/649℃/566℃/566℃，该机组由 CE 和 WH 公司设计制造，迄今为止，是最高参数的超超临界机组。这两台机组为美国超临界机组的设计、制造、运行提供了宝贵经验。

到 20 世纪 60 年代中期, 新增机组中有一半采用超临界参数, 但到 70 年代, 订货台数急剧下降。根据 EPRI 的一份调查报告认为, 这一下降的原因是多方面的, 当时美国缺乏超临界机组调峰运行的经验, 最重要的是核电站担负起了基本负荷, 因而对带基本负荷的超临界机组的需求量出现了下降, 在采用超临界参数方面出现了反复。尽管如此, 美国在 1967~1976 年的 10 年期间, 共安装了 118 台超临界机组, 单机最大容量为 1300MW, 到 20 世纪 80 年代初, 超临界机组仍增至 170 余台 (其中多数为超超临界机组), 占燃煤机组的 70% 以上, 占总装机容量的 25.22%, 其中单机容量介于 500~800MW 者占 60%~70%, 至 1994 年共安装和投运了 9 台 1300MW 的超临界机组。

2. 日本

日本发展超临界机组起步较晚, 但发展速度很快, 收效显著。自日立公司从美国 B&W 公司引进的第一台 600MW 的超临界机组于 1967 年在沛崎电厂投运后, 日本其他公司也分别引进了美国和德国的超临界技术, 同时建立了自己的试验台。日本发展超临界技术采用的是引进、仿制、创新的技术路线, 即先从国外引进成熟的机组和制造技术, 然后立即组织力量进行技术消化和仿制, 并在此基础上, 进一步投入开发研究, 形成本国的技术特点, 进而进行精心设计、制造和批量生产。从引进技术到自制机组只需 2~3 年时间, 容量从 600~1000MW 等级只需 3~5 年时间。

20 世纪 70 年代以来, 电网负荷峰谷差增大, 加之适合带基本负荷的核电站的兴起, 日本的超超临界机组不仅高效, 而且具有亚临界机组同样的可靠性与运行灵活性, 能自如地适应变压运行带周期性调峰负荷的要求。目前, 日本已跃居为发展超超临界机组的先进国家。

日本在提高蒸汽压力和温度参数对机组效率的影响进行了比较, 采用 31MPa 主蒸汽压力和二次中间再热由于压力的提高和系统的复杂, 使机组制造成本明显提高, 缺乏市场竞争力。所以在 20 世纪 90 年代后, 日本各公司都转向生产高温参数的超超临界机组。2000 年在橘湾电厂 (2 号机) 投运的容量为 1050MW、蒸汽参数为 25.5MPa/600℃/610℃的超超临界机组是目前日本蒸汽温度参数最高的机组。

截止到 1989 年 3 月, 日本总装机容量 75870 MW 中, 超临界压力机组的容量为 49350MW, 占总装机容量的 65%, 比重很大, 从而使火电机组全国供电煤耗由 1963 年的 366g/(kW·h) 降低到 1987 年的 335g/(kW·h)。1989 年和 1990 年在川越电厂投运的两台 700MW 二次再过热机组的参数是 31MPa/566℃/566℃/566℃, 在满负荷下的热效率达 41.9%, 自投运以来情况很好。目前, 日本 450MW 以上的机组全部采用超临界参数, 1993 年以后, 已把蒸汽温度提高到 566℃/593℃和 593℃/593℃, 即全部采用了我们所说的超超临界技术。

3. 俄罗斯

前苏联坚持发展超临界机组, 且是拥有超临界机组最多的国家。前苏联所有 300MW 及以上容量的机组全部采用超临界参数。前苏联共有超临界机组 224 台, 占总装机容量的 50% 以上, 且大多数为 300MW 机组。由于大量采用超临界机组, 因此前苏联火电机组的平均供电煤耗位居世界水平的前列, 达到 326g/(kW·h)。

前苏联发展超临界技术主要依靠本国力量, 以自我开发为主, 尽管初期也走过不少弯路, 出现过各种各样的问题, 但其经过长期的试验研究后, 目前已具有一套比较完整的超临

界技术和产品系列。超临界机组成为前苏联火力发电厂的主力机组。由于没有吸收别国先进技术，因此前苏联超临界技术发展不快，总体技术水平不高。目前，俄罗斯研制的新一代大型超超临界机组采用的参数为(28~30MPa)/(580~600℃)。

4. 欧洲

丹麦是热能动力方面很先进的国家，在火电机组上也处于领先地位，于1998年在Skaebæk发电厂投产的400MW机组，两次中间再过热，蒸汽参数为29MPa/582℃/582℃/582℃，加以海水直接冷却，额定背压为2.2 kPa，净效率高达49%，是当今世界上效率最高的火电机组。于1999年在Nordjylands电厂投产的400MW机组，使用同样的蒸汽初参数，效率也高达47%。丹麦2001年在Avedøre电厂投产的375MW机组，采用的参数为30MPa/580℃/600℃，其净效率也高达48%。

德国是研究、制造超临界机组最早的国家之一，在1956年投运了一台容量为88MW的超超临界机组，因容量较小，未获得很大的发展。20世纪70年代，由于燃料价格上涨，政府对环保要求日益严格，对排放量的控制加强，需要建造以煤为燃料的高效率电厂，因此，德国便开始发展大功率超临界机组。德国在1972年投运了一台430MW的超临界机组，在1979年投入了一台475MW的二次再过热机组。德国VEAG电力公司在1999年和2000年于Lippendorf电厂投产的两台900MW褐煤机组，蒸汽参数为26.8MPa/554℃/583℃，净效率为42%。目前，德国已投运和在建的超临界和超超临界机组近20台，其中具有代表性的机组是：于2000年在Niederaussem电厂投运的965MW超超临界机组（蒸汽参数为26.9MPa/580℃/600℃）；于2000年在Hessler电厂投运的700MW超超临界机组（蒸汽参数为30MPa/580℃/600℃）。由于采用了以超超临界参数为主的多项提高效率的措施，因此机组净效率高达45.2%，当机组滑压运行时，可超负荷5%，最低负荷为50%，电厂大修期最少为4年。

意大利、荷兰、芬兰等国在采用超临界机组方面也都有成功的经验。

5. 超超临界火电机组的发展趋势

为了进一步提高超超临界机组的热效率，美国、日本、欧洲等世界先进工业国家都相继提出了下一阶段的开发计划，并正在进行实施。

日本是能源消费大国，正在加大力度推进节能工作，并在电力方面对超高性能的火力发电方式进行开发；并提高传统的燃煤火力发电设备蒸汽参数，以得到更高的效率。电能开发公司在1979年开始进行有关USC技术开发的可行性调查，从1981年开始与锅炉和汽轮机制造厂家协作进行各种验证实验（并且从1982年开始从通产省拨款得到研究经费，从而推进了研究开发工作）。日本选取机组的压力参数比较低，除川越的两台机组选用了31MPa外，其他大部分机组为24~25MPa。据分析，日本制造商认为若将机组的压力参数提得过高，汽轮机超高压部分的通流部分气动损失就会增加；另外，提高压力还需要增大机组用材量，使机组的制造成本增加，从而产品的市场竞争力减弱。所以，日本在1993~2003年投运的超超临界机组的主蒸汽压力均为24~25MPa，也就是超临界机组的压力参数水平。

超临界技术是把传统的火力超临界蒸汽参数24.12MPa/538℃/566℃提高到31.38~34.32MPa/595~650℃，以提高发电效率。电能开发公司将本技术开发分为两个阶段进行。USC开发目标列于表1-2中。

表 1-2

电能开发公司 USC 开发目标

参数名称		现 状	开 发 目 标	
			第 1 阶段	第 2 阶段
蒸汽参数	压力 (MPa)	24.12	31.38	34.32
	温 度 (°C)	538/538	595/595/595	650/595/595
发电设备设计效率 (%)		41.5	44.0	44.8
年平均发电效率 (%)		39.8	42.2	43.0
提高效率 (相对值, %)		以现状为基础	6.0	8.0
年节约煤量 (t)		以现状为基础	约 130000	约 170000

日本超超临界技术开发研究工作的完成, 为其发电设备制造企业的研制和生产超超临界火电机组提供了科学的依据。

1999 年, 美国能源部 (DOE) 提出了火电新技术发展的 Vision 计划, 计划开发蒸汽参数为 35MPa/760°C/760°C/760°C 的大功率超超临界火电机组, 其热效率将高于 55% (比蒸汽温度为 600°C 的超超临界机组的热效率提高 8%~10%), CO₂ 和其他污染物的排放约减少 30%。美国能源部开发超超临界技术的目的有两个: 一是选择先进的材料, 使得超超临界机组的成本具有竞争性、环保可接受, 并能够燃用高硫煤; 二是提高美国发电设备制造商生产的高效燃煤超超临界火电机组在世界范围内的竞争力。

欧洲国家从 20 世纪 90 年代开始实施 COST501 计划, 实现了蒸汽温度为 580°C/600°C 的超超临界机组的研制; 1998 年, 开始实施 COST522 计划, 实现了蒸汽温度为 600°C/620°C 的超超临界机组的研制。欧盟从 1998 年 1 月 1 日启动了“AD-700°C 计划”, 其目标有两个: 一是供电热效率由目前的 47% 提高到 55% (深海海水冷却) 或 52% (内陆电厂); 二是厂房结构更加紧凑, 以降低燃煤电厂的投资。“AD-700°C 计划”的战略意义是使欧盟成员国的燃煤火电机组的技术水平始终处于世界的领先水平, 并显著提高欧盟成员国燃煤火电机组的竞争力。采用 700°C/720°C 的超超临界机组可以使 CO₂ 的排放量减少 30%, 从而满足“京都议定书”的要求。欧洲国家选取的超超临界机组蒸汽压力比较高, 基本上在 26~30MPa 范围内。

现代超超临界机组为适应调峰的需要, 还要求其锅炉和汽轮机能够滑压运行。当机组负荷低于 75%~80% 时, 超超临界锅炉锅内压力已处于亚临界状态。因此在设计超超临界锅炉时, 还需要同时考虑锅炉在亚临界压力状态下运行的可靠性。但从经济性考虑, 超超临界机组应尽量带基本负荷运行, 否则将影响其高效节能优势的发挥。

二、超超临界机组热力参数优化及其对热效率的影响

在发电热力循环中, 蒸汽参数是决定机组热效率的重要参数。燃煤火电机组的热力系统是按照朗肯循环运行的, 提高蒸汽的初参数 (蒸汽压力和温度), 采用再热系统和增加再热次数都能提高循环的热效率。在一定范围内, 新蒸汽温度或再热蒸汽温度每提高 10°C, 机组的热耗就可下降 0.25%~0.3%。如果增加再热次数, 例如采用二次再热, 在同样蒸汽参数下热效率可高于一次再热。常规亚临界机组的典型参数为 16.7MPa/538°C/538°C, 发电效率约为 38%~39%。超临界机组的典型参数为 24.1MPa/538°C/566°C, 对应的发电效率约为 41%~42%。超超临界参数实际上是在超临界参数的基础上向更高压力和温度提高的

过程。通常认为超超临界是指压力达到 30~35MPa, 温度达到 593~600℃或者更高的参数, 并具有二次再热的热力循环。还有一种观点认为, 温度为 566℃一直是超临界参数的准则, 任何超临界新蒸汽温度或再热蒸汽温度超过这一数值时, 也被划为超超临界参数范畴, 或者称为提高参数的超临界机组。在国外的技术资料上, Ultra Supercritical (USC) 通常用来代表这类参数的机组, 中文译成超超临界, 也可理解为优化的或高效的超临界机组。

1. 超超临界的热力学概念

火电厂的工质是水, 常规条件下对水进行加热, 当水的温度达到给定压力下的饱和温度时, 将产生相变, 水开始从液态变成汽态, 并出现一个饱和水与饱和蒸汽两相共存的区域, 这时尽管加热仍在进行, 但汽水两相的温度不再上升, 直至液态水全部蒸发完毕, 干饱和蒸汽才继续升温, 成为过热蒸汽。但当温度超过临界温度 t_c 值时, 水的液相就不存在了, 与临界温度相对应的饱和压力称为临界压力 p_c , 临界点的压力和温度是水的液相和汽相能够平衡共存的最高值, 为固有物性常数。水的临界参数为: $t_c = 374.15^\circ\text{C}$, $p_c = 22.129\text{MPa}$ 。在临界点以及超临界状态时, 将看不见蒸发现象, 水在保持单相的情况下从液态直接变成汽态。一般将压力大于临界点 p_c 的范围称为超临界区, 压力小于 p_c 的范围称为亚临界区。从物理意义上讲, 根据机组采用的蒸汽参数划分, 只有超临界和亚临界之分, 超超临界是我国人为的一种区分, 也称为优化的或高效的超临界参数。目前, 超超临界与超临界的划分界限尚无国际统一标准。一般认为, 蒸汽压力大于 25MPa、蒸汽温度高于 580℃时的状态称为超超临界状态。

2. 温度

热力循环分析表明, 对于一定容量的机组, 当蒸汽初压不变, 提高蒸汽初温, 循环效率将会提高。同时, 由于新蒸汽比体积增大和低压缸排汽湿度减小, 汽轮机的内效率也可提高, 而提高蒸汽的温度对提高机组热效率更有益。蒸汽初温的提高主要受材料的许用温度限制, 当初温提高到一定程度, 锅炉的过热器和再热器、汽轮机的高中压进汽部分的材料需要采用热强度高的奥氏体合金钢。为此, 日本的研究机构把主要精力放在了提高蒸汽温度方面, 并在材料方面与日本钢铁工业合作研制出了配套的锅炉与汽轮机奥氏体耐热钢系列用材。

关于蒸汽温度参数的选用, 随着美国、日本和欧洲对 600℃等级的新型高温材料的开发成功, 超超临界汽轮机的主蒸汽和再热蒸汽温度已普遍提高到 580~593℃, 在 2003~2004 年投运的一些机组的蒸汽温度均超过了 600℃。据分析, 在一定的范围内, 主蒸汽温度或再热蒸汽温度每提高 10℃, 机组的热耗就可下降 0.25%~0.3%。从理论上讲, 当超超临界机组蒸汽参数提高时, 热效率也随之提高, 在主蒸汽压力不变的情况下, 主蒸汽温度和再热蒸汽温度从 538℃/566℃提高到 593℃/593℃, 机组热效率能够改善 2%~2.5%。为了使超超临界机组降低制造成本, 提高市场竞争力, 开发热强度高、工艺性好、价格低廉的高温材料是最关键的问题。

3. 压力

当新蒸汽初温不变, 仅提高初压时, 在一定范围内可提高机组热效率。但单独提高初压过大, 机组热效率反而会降低, 其主要原因是, 初压提高时蒸汽比体积减小, 将使汽轮机超高压通流部分叶片高度减小, 甚至需要采用部分进汽方式, 这样将使叶片级的二次流损失和轴封漏汽损失都增大, 将抵消一部分提高压力参数所带来的好处。同时, 低压缸的排汽湿度