



■ 1000MW火力发电机组培训教材



GUOLU SHEBEI XITONG JI YUNXING

锅炉设备系统及运行

朱全利 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

■ 1000MW火力发电机组培训教材

GUOLU SHEBEI XITONG JI YUNXING

锅炉设备系统及运行

朱全利 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《1000MW 火力发电机组培训教材》的第一分册。全书共分十二章,详细介绍了我国引进型 1000MW 超超临界锅炉的基本型式、构造和发展,超超临界锅炉的热化学问题以及锅炉辅助设备及系统;详细地阐述了超临界锅炉的启停、运行调整、故障处理和火电厂烟气脱硝等问题。

本书适合从事国产 1000MW 超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,也可作为电厂生产人员的培训教材,亦可供有关专业人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备系统及运行/朱全利主编. —北京:中国电力出版社, 2010.5

1000MW 火力发电机组培训教材

ISBN 978-7-5083-9709-2

I. ①锅… II. ①朱… III. ①火电厂—锅炉运行—技术培训—教材 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 205524 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

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 609 千字

印数 0001—3000 册 定价 46.00 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

编 审 委 员 会

主 任：陈 飞

副主任：胡念苏 范云滩 黄忠祥 罗家林
刘克兴

委 员：（以姓氏笔画为序）

马广平	王义平	王建梅	刘先斐
李 庆	李正奉	朱全利	汪文化
邹向群	陈志和	肖启标	杨 俊
周荣迁	周柏青	郑桂波	俞红梅
郝忠义	黄 梅	常 湧	喻亚非
熊立红	熊扬恒	蔡 锴	樊天竞
滕维忠			

前 言

我国电力工业已经进入大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。目前,以大容量和超临界技术为特征的火力发电机组被广泛采用,这对火力发电设备的制造和运行水平都提出了更高要求,生产运行人员和从事相关工作的技术人员也面临知识的更新。

为帮助现场生产运行人员了解 1000MW 火力发电机组的结构、系统、运行等知识,编者编写了本套《1000MW 火力发电机组培训教材》,力求将我国目前在 1000MW 火力发电机组方面的最新成果展示给读者。丛书包括《电气设备系统及运行》、《锅炉设备系统及运行》、《水处理设备系统及运行》、《控制设备系统及运行》、《汽轮机设备系统及运行》五个分册。

《锅炉设备系统及运行》分册是本丛书的第一分册。全书详细介绍了我国三大动力集团生产的引进型 1000MW 超超临界锅炉结构及系统、辅助设备的原理、结构、特性、运行、维护等。内容包括锅炉本体结构,锅炉的辅助设备,锅炉机组的运行等。

本分册由武汉大学朱全利主编、熊扬恒副主编,参加编写的人员有武汉大学的朱全利(前言、第二章、第九~十二章)、熊扬恒(第一章、第三章)、熊立红(第四章第一节、第六章、第八章第六节)、喻红梅(第四章第二~七节、第五章、第七章、第八章第一~五节)。

本分册由武汉大学胡念苏教授担任主审,他对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此谨表示诚挚的谢意。

本分册在编写过程中,参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等。在收集资料过程中得到华能沁北发电有限公司、大唐湖南湘潭发电有限责任公司、广东红海湾发电有限公司的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 9 月

目 录

前言

第一章 概述	(1)
第一节 超临界与超超临界参数.....	(1)
第二节 超超临界燃煤发电技术的发展与现状.....	(2)
第三节 超超临界锅炉机组的技术特点	(16)
第四节 超超临界锅炉工作原理及基本型式	(22)
第五节 国产典型超超临界锅炉简介	(29)
第二章 燃料燃烧及燃烧设备	(43)
第一节 燃煤的成分及主要特性	(43)
第二节 点火及助燃用油	(49)
第三节 燃煤的着火及燃烧特性	(51)
第四节 燃煤的结渣和沾污特性	(57)
第五节 煤粉锅炉燃烧设备	(63)
第六节 旋流煤粉燃烧器	(67)
第七节 直流煤粉燃烧器	(74)
第八节 煤粉炉的点火装置	(80)
第九节 等离子体点火技术	(86)
第十节 锅炉高效低 NO_x 燃烧技术	(95)
第三章 煤粉制备及系统	(102)
第一节 概述.....	(102)
第二节 煤粉的性质.....	(103)
第三节 制粉系统.....	(106)
第四节 磨煤机.....	(110)
第五节 制粉系统的辅助设备.....	(134)
第四章 超超临界锅炉给水预热与蒸发系统	(139)
第一节 省煤器.....	(139)
第二节 水冷壁结构及系统.....	(141)
第三节 水冷壁的管壁温度.....	(153)
第四节 直流锅炉的水动力不稳定性.....	(156)
第五节 直流锅炉蒸发受热面中流体的脉动.....	(160)
第六节 直流锅炉蒸发受热面中的热偏差.....	(162)
第七节 直流锅炉蒸发受热面的传热恶化现象.....	(165)

第五章 超超临界锅炉过热器和再热器系统	(170)
第一节 概述	(170)
第二节 过热器结构及系统	(171)
第三节 再热器结构及系统	(185)
第四节 蒸汽温度特性及蒸汽温度调节	(190)
第五节 过热器、再热器的热偏差	(197)
第六节 受热面沾污、高温腐蚀及高温破坏	(201)
第六章 超超临界锅炉风烟系统	(204)
第一节 概述	(204)
第二节 空气预热器	(209)
第三节 容克式空气预热器的维护	(216)
第四节 上海鼓风机有限公司生产的送风机和一次风机	(219)
第五节 豪顿华生产的送风机和一次风机	(230)
第六节 引风机	(235)
第七节 轴流风机的运行问题	(242)
第七章 超超临界锅炉热化学问题	(245)
第一节 概述	(245)
第二节 直流锅炉内盐分的溶解与杂质的沉淀	(245)
第三节 直流锅炉的锅内腐蚀	(250)
第四节 超超临界锅炉的给水标准	(253)
第五节 直流锅炉的水处理	(256)
第六节 超超临界锅炉的清洗	(258)
第八章 超超临界锅炉辅助设备及系统	(261)
第一节 静电除尘器	(261)
第二节 吹灰系统及其运行	(266)
第三节 除灰系统及其运行	(272)
第四节 除渣系统及其运行	(279)
第五节 空气压缩机及压缩空气系统	(286)
第六节 脱硫设备及系统	(291)
第九章 超超临界锅炉的启停	(295)
第一节 概述	(295)
第二节 直流锅炉的启动特性	(296)
第三节 超超临界锅炉的启动旁路系统	(298)
第四节 超超临界锅炉的启动	(304)
第五节 超临界锅炉的停炉和停用保护	(317)
第十章 锅炉的正常运行及调整	(324)
第一节 锅炉运行调整的任务	(324)
第二节 直流锅炉状态参数特性	(324)
第三节 直流锅炉蒸汽参数调节的原理	(327)

第四节	超超临界锅炉的运行调节.....	(331)
第五节	超超临界锅炉的控制.....	(333)
第六节	DG3000/26.15-II 1 型锅炉运行调整	(341)
第十一章	锅炉常见故障及处理.....	(345)
第一节	受热面损坏.....	(345)
第二节	锅炉灭火与烟道再燃烧.....	(350)
第三节	锅炉事故处理规范.....	(353)
第四节	锅炉典型事故解析.....	(360)
第十二章	火电厂烟气脱硝.....	(368)
第一节	概述.....	(368)
第二节	脱硝工艺及特点.....	(371)
第三节	脱硝系统的运行操作.....	(373)
参考文献		(388)

第一章

概 述

今后相当长一段时间内,世界能源仍将主要依赖化石燃料。我国的能源结构决定了以火力发电机组为主的格局,提高燃煤机组的效率、降低污染物排放是调整我国电力结构的重要任务,发展大容量、高参数、高效率、低污染的燃煤机组是我国电力工业的基本途径。

超临界、超超临界发电机组在发达国家得到了广泛应用,随着材料技术、制造技术的发展,其可靠性、可用率、热机动性、机组寿命等已经可以与成熟的亚临界机组媲美;加装尾部烟气脱硫、脱硝和高效除尘装置后,可以实现较低的污染物排放,满足严格的环境排放标准。

我国在掌握亚临界 300MW、600MW 机组设计和制造技术以后,通过引进、消化、吸收、再创新,基本掌握了超临界机组的设计、制造、建设和运行管理技术。“十五”期间超超临界燃煤发电技术的研发及其依托工程的实施,标志着我国电力工业实现了大的跨越,大大缩短了与世界先进水平的差距。

第一节 超临界与超超临界参数

工程热力学将水的临界点状态参数定义为:压力 $P=22.115\text{MPa}$ 、 $t=374.15^\circ\text{C}$ 。在水的参数达到该临界点时,水的完全汽化会在一瞬间完成,水蒸气的密度会增大到与液态水一样,这个条件叫做水的临界的参数。在临界点,饱和水和饱和蒸汽之间不再有气、水共存的两相区。当机组参数高于这一临界状态参数时,通常称其为超临界参数机组。

与较低压力下的水的特性不同,在压力很高的情况下,特别在临界点附近,水的质量定压热容 C_p 值会有较显著的变化。水的比热随着温度升高而升高,而蒸汽的比热随着温度的增加而下降。在临界点处水的比热达到最大,比容和焓值也随压力增加而迅速增加(但随着压力的增加,其增加幅度逐渐减小),而其动力黏度、导热系数和密度均出现显著下降。显然进入超临界以后,水的物性随温度的变化异常巨大,流动和传热特性也将出现显著的变化。

水蒸气动力循环焓熵图如图 1-1 所示,在超临界点 $C(22.115\text{MPa}, 374.15^\circ\text{C})$ 附近,水的液态和气态密度趋于相同,蒸发热量也趋近于零。亚临界下蒸汽动力循环为 $1\rightarrow2\rightarrow3\rightarrow4\rightarrow5\rightarrow6\rightarrow1$ [见图 1-1 (a)],超临界下蒸汽动力循环为 $1\rightarrow2\rightarrow5\rightarrow6\rightarrow1$ [见图 1-1 (b)]。

当水蒸气的状态参数高于上述临界点的压力和温度时,则称为超临界参数。

超超临界只是一个商业名词,热力学中没有这个分界点。超超临界参数的概念也不具备明确的物理定义,仅表示发电机组具有更高的压力和温度,代表了机组技术参数或技术发展的更高阶段。各国对超超临界参数的起始点定义也有所不同。日本的超超临界参数定义为压

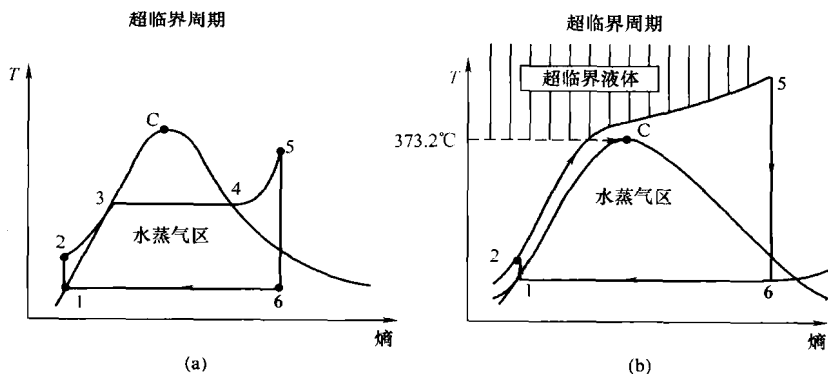


图 1-1 水蒸气动力循环熵焓图

(a) 亚临界下蒸汽动力循环；(b) 超临界下蒸汽动力循环

力大于 24.2MPa 或温度达到 593℃；丹麦的超超临界参数定义为压力大于 27.5MPa；西门子则是从材料的等级来区分超临界和超超临界机组；我国电力百科全书将超超临界参数定义为压力高于 27MPa。一般国内现在公认的超超临界参数起始点为压力高于 25MPa 或温度高于 593℃。

国际上也常把超超临界 (ultra - supercritical) 机组称为高效超临界 (high efficiency supercritical) 机组或高参数超临界 (advanced supercritical) 机组。之所以这样定义是因为这个参数是锅炉、汽轮机只需使用现代超临界机组的用钢上限，超过这个参数高温高压部件就必须采用改进或新开发的耐热钢种。

第二节 超超临界燃煤发电技术的发展与现状

一、国外超超临界机组发展

1. 超超临界机组发展简史

在蒸汽动力装置的发展过程中，超临界和超超临界机组是同时研发、交叉发展的。

1957 年，美国投运了蒸汽参数为 31MPa、612/566/538℃、容量为 125MW 的高参数机组。目前全世界已投入运行的超临界及以上参数的机组超过 650 台。据不完全统计，目前，美国有 170 多台，俄罗斯 224 台，日本 94 台，德国 10 余台，意大利 13 台，欧洲其他国家约 60 余台，南非、澳大利亚均有超临界机组，我国超过 80 台。这些机组中属于超超临界参数的机组大约有 80 余台，其中，国外有 10 台 1000MW 级超超临界机组已投入运行（日本 9 台、德国 1 台），我国有 11 台 1000MW 级和 12 台 600MW 级超超临界机组投入运行。目前，世界上超超临界机组单机最大容量已达 1200~1300MW。

早在 20 世纪 60 年代初，美国、俄罗斯和日本就开始发展超临界大型机组。超临界压力机组早期发展的蒸汽参数定在压力 25MPa，蒸汽温度 560℃ 左右。随着蒸汽压力温度的提高，主要耐热材料提高了级别，系统辅机阀门全部更新。受当时工业制造水平的影响，直流锅炉的采用及其系统的复杂化，早期生产的超临界压力机组故障率很高，使其发展速度放慢。

20 世纪 80 年代以来，随着材料科学的发展，辅机及系统控制技术的成熟，超临界技术

得以迅速发展。经过 50 多年的研究、完善和发展,目前超临界与超超临界机组进入了成熟和商业化的运行阶段。

超临界和超超临界发电技术的发展过程可以大致分成三个阶段。

第一阶段,从 20 世纪 50 年代开始,以美国和德国为代表,其机组起步参数就是超超临界参数。美国西屋公司于 1959 年制造了一台容量为 3100MW 的超超临界机组,进汽压力为 34.5MPa,进汽温度达到 649℃。由于机组可靠性低,在经历了初期超超临界后,从 20 世纪 60 年代开始至 70 年代,美国超临界机组大规模发展时期所采用的参数均降低到常规超临界参数,即压力 24.1MPa,温度 538/566℃。直至 20 世纪 80 年代,美国超临界机组的参数始终稳定在这个水平。

第二阶段,从 20 世纪 80 年代起,是超临界机组以美国 GE、西屋公司为中心,优化及新技术发展阶段。在 20 世纪 70 年代,美国 GE 和西屋公司分别将超临界技术转让给日本和欧洲,超临界机组的市场从 20 世纪 80 年代起转移到了欧洲及日本。由于材料技术的发展,尤其是锅炉和汽轮机材料性能的大幅度改进,以及对电厂水化学方面认识的深化,早期超临界机组所遇到可靠性低的问题被克服。同时,对已投运的机组进行了大规模的优化及改造,可靠性和可用率指标已经达到甚至超过了相应的亚临界机组。通过改造实践,形成了新的结构和新的设计方法,大大提高了机组的经济性、可靠性和运行灵活性。与此同时,GE 与西屋、日立、东芝、三菱等公司联合进行了一系列超超临界机组的开发设计,使超超临界技术的发展进入了一个新的阶段。

第三阶段,大约是从 20 世纪 90 年代开始,世界上超超临界机组进入了快速发展的阶段。超超临界机组在保证机组高可靠性、高可用率的前提下采用了更高的蒸汽温度和压力,其主要原因是国际上环保要求的日益严格。同时新材料的开发成功和常规超临界技术的成熟也为超超临界机组的发展提供了条件。主要以日本(三菱、东芝、日立等公司)、欧洲(西门子、阿尔斯通等公司)的技术为主,这个阶段超超临界机组技术的发展具有以下三个方面的特点。

(1) 蒸汽压力并不太高(多为 25MPa 左右),而蒸汽温度相对较高,若温度按 50 ℉一档划分,则可分为 538℃(1000 ℉)、566℃(1050 ℉)、593℃(1100 ℉),考虑到材料的高温性能,产品实际应用的温度又有 600/610℃(其材料与 593℃相同)一档。高温参数主要影响材料的选用;锅炉过热器、再热器和汽轮机进汽段部件如阀门、进汽管、蒸汽室、叶片和转子的设计。高温、高强度材料的成果应用使投入商业运行的一系列超超临界机组的温度参数不断提高,主要以日本的技术发展为代表。近年欧洲及日本新投运的机组,大多数压力保持在 25MPa 左右,进汽温度均提高到 580~600℃。

(2) 蒸汽压力和温度同时都取较高值(28~30MPa, 600℃),以获得更高的效率。主要以欧洲的技术发展为代表,在采用高温的同时,压力也提高到 27MPa 以上。压力的提高不仅影响到材料强度及结构设计,而且由于汽轮机低压缸排汽湿度的原因,当压力提高到某一等级后,必须采用更高的再热温度或二次再热循环。近年来,提高压力的业绩主要来自欧洲的设备制造厂家。

(3) 开发更大容量的超超临界机组以及百万等级机组倾向于采用单轴方案。为尽量减少汽缸数,大容量机组的发展更注重大型低压缸的开发和应用,日本几家公司和西门子、阿尔斯通公司等在大功率机组中已经考虑使用末级钛合金长叶片。

2. 美国超超临界机组发展

美国于 1957 年投运第 1 台 125MW 试验性的高参数超临界机组 (31MPa、621/566/538℃)，由于初期直流锅炉采用了过高的蒸汽参数，超出当时的技术发展水平，使得机组在运行中暴露出许多问题，降低了机组运行的可靠性。降低了蒸汽参数后，以后陆续投运的机组情况有所好转。到 20 世纪 70 年代末，已有 100 多台超临界机组运行，占当时全部火电容量的 30%。1972 年投运了首台世界上单机容量最大的 1300MW 超临界机组，至 1994 年此类机组共投运 9 台，代表性机组如表 1-1 所示。目前美国超临界和超超临界机组在数量上居世界第二位，其绝大多数超临界机组的主蒸汽参数为 24.13MPa、主汽温度和再热温度为 538/566℃。

表 1-1 美国现役单机容量最大机组 (1300MW)

电 站	锅炉蒸发量 (t/h)	运行方式	蒸汽参数 (MPa、℃)	投运时间 (年)
Cumberland	4535	定压	24.2、538/538	1972
Amos	4433	定压	24.2、538/538	1973
Gavin	4433	定压	24.2、538/538	1974
Mountaineer	4433	定压	24.2、538/538	1980
Zimmer	4433	定压	24.2、538/538	1991

在 20 世纪 80 年代中期，EPRI 对美国 159 台超临界机组进行了调查，显示超临界机组的效率平均比同容量亚临界机组高 3% 左右，经过初期的运行，机组可用率和可靠性达到与汽包锅炉机组相当的水平。20 世纪 80 年代后期，EPRI 根据早期的设计和研究结果，在锅炉和汽轮机部件材料选择方面开展了进一步的工作，以使机组能适应越来越多的启停次数。1990 年前后，超临界机组的温度和压力又趋于提高，并且随着运行技术的提高和数字化控制技术的发展，快速启停和调峰运行变得越来越普遍，一些机组的负荷运行极限由 50% 下降到 25%。EPRI 还对超超临界机组蒸汽参数和容量进行了优化研究，认为超超临界机组采用蒸汽压力 31MPa，温度 566/593℃，二次再热，容量为 700~800MW 为最佳，重新开发了蒸汽参数为 31MPa、593/593/593℃ 的二次再热超超临界机组。相对而言，美国采用二次再热的机组较多。

3. 俄罗斯 (含前苏联) 超超临界机组发展

俄罗斯超临界机组的研制主要立足于国内自主开发，并有自己的特点。

前苏联在 20 世纪 40 年代末就建立了小容量超临界试验机组，取得一定的经验后便开始生产 300MW 机组。1963 年投运首台 300MW 超临界机组，参数为 23.5MPa、580/565℃，后经改进和完善，并将蒸汽参数降低到 540/540℃，使机组的可靠性得到提高，其后所有 300MW 及以上的机组都采用超临界技术。迄今，基本上形成 300、500、800、1200MW 等 4 个容量等级，蒸汽参数大多为常规超临界参数，压力一般为 24MPa，蒸汽温度一般在 545~565℃ 的范围内。

第一台超临界 500、800MW 机组于 1968 年投运，列宁格勒金属工厂 (LMZ) 于 1978 年生产了一台 1200MW 的 K—1200—23.5—2 型超临界机组，1981 年投入运行，参数为

23.5MPa、540/540℃，已经运行了近 30 年，仍是当今世界上容量最大的单轴汽轮发电机组，但是至今只生产了一台。前苏联 300MW 及以上机组全部采用超临界参数，至今已有 232 台超临界机组投入运行，其超临界机组占火电机组容量的 50% 以上，全国大约 40% 的电力由超临界机组提供，是超临界机组数目最多的国家。由于大量采用超临界机组，前苏联火电机组的平均供电煤耗位居世界水平的前列。20 世纪 90 年代以来，俄罗斯还生产了近 20 台 300、500、800MW 的机组出口到中国和古巴等。

俄罗斯的超临界机组在设计上采用了有别于其他国家的技术。在燃用低质高灰分煤、区域供热、汽轮机末级设计、给水加氧处理等方面有其自己的特点。包括：1200MW 汽轮机低压末级采用钛叶片，采用直接接触式给水加热器以降低热耗，采用 Baumann 式的低压通流部分设计，采用带加热装置的高中压法兰以缩短启动时间，采用两侧布置的凝汽器以降低蒸汽流速并改善真空，采用超临界机组热电联产以提高能源利用率等。

目前位于圣彼得堡的彼得格勒金属工厂和莫斯科动力学院又设计了新一代高参数超临界机组，蒸汽参数为 30~32MPa、(580~600)/(580~600)℃，给水温度 300℃。当凝汽器压力为 3.4~3.6kPa 时，预计发电站的效率为 44%~46%。

4. 日本超超临界机组发展

日本资源匮乏，注重发电机组效率。日本从 20 世纪 60 年代中期开始发展超临界机组，虽然起步较晚，但日本吸收了美国和欧洲的最新技术，发展快、收效大。到目前为止，日本已有 60 多台超临界以上参数的机组在运行。日本采取引进、仿制、创新的技术路线，与俄罗斯形成鲜明的对比。日本日立公司于 1967 年从美国 B&W 公司进口首台 660MW 超临界机组，参数为 24.12MPa、538/566℃，在姊崎电厂投运。期间其他公司也分别引进了美国和德国的超临界技术，同时也建立了自己的试验台，很快由仿制过渡到应用自己的研究成果。两年后仿制的同型机组就已投运，1971 年投运的 600MW 超临界机组则有效地利用了日本自己的技术。

直到 20 世纪 90 年代初期，日本生产的超临界机组参数一般都限制在 24.6MPa、538/566℃。日本在通过吸收美国技术，成功发展超临界技术的基础上，进一步开发了超超临界机组。1989 年 6 月，日本投运了第一台采用超超临界参数的川越电厂 1 号机组，该机组容量为 700MW，主蒸汽压力为 31MPa，蒸汽温度和再热蒸汽温度为 566/566/566℃（二次再热），机组热效率达到 41.9%。1993 年以后，蒸汽温度逐步提高到接近 600℃。蒸汽参数为 24.1MPa、600/610℃的 1050MW 机组在三隅电站于 2000 年发电。目前，在日本蒸汽参数最高的机组是 2000 年在橘湾电站投运的 2 台容量为 1050MW、蒸汽参数为 25.5MPa、600/610℃的超超临界机组。日本现在容量为 450MW 以上的机组均采用超临界参数，一般为 24.1MPa、538/566℃，一次再热；少数机组采用 24.1MPa、538/538℃或 24.1MPa、538/552/566℃，二次再热。日本主要的超超临界机组大部分是大容量机组，见表 1-2。

表 1-2 日本 1990 以来投运的主要超超临界机组

电 厂	电力公司	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa、℃)	投运时间 (年)
KAWAGOE 1 号	Chubu	700	31、566/566/566	1989
KAWAGOE 2 号	Chubu	700	31、566/566/566	1990

续表

电 厂	电力公司	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa、℃)	投运时间 (年)
Hekinann 3 号	Chubu	700	24. 6/538/593	1993
Noshiro 2 号	Tohoku	600	24. 6/566/593	1994
Nanao - Ohta 1 号	Hohuriku	500	24. 6/566/593	1995
Reihoku 1 号	Kyushu	700	24. 1/566/566	1995
Haramachi 1 号	Tohoku	1000	25/566/593	1997
Matsura 2 号	EPDC	1000	24. 6/93/593	1997
Misumi 1 号	Chugoku	1000	25/600/600	1998
Haramachi 2 号	Tohoku	1000	25/600/600	1998
Nanao - Ohta 2 号	Hohuriku	700	24. 6/593/593	1998
Hekinann 4 号	Chubu	1000	24. 6/566/593	2001
Hekinann 5 号	Chubu	1000	24. 6/566/593	2002
Tsuruga 2 号	Hohuriku	700	24. 6/593/593	2000
Tachibana - wan	Shikoku	700	24. 6/566/593	2000
Karita 1 号 (PFBC)	Kyushu	350	24. 6/566/593	2000
Reihoku 2 号	Kyushu	700	24. 6/593/593	2003
Tachibana - wan 1 号	EPDC	1050	25/600/610	2000
Tachibana - wan 2 号	EPDC	1050	25/600/610	2001
Isogo	EPDC	600	25. 5/600/610	2002
Hitachbana 1 号	Tokyo	1000	24. 5/600/600	2002
Maizuni 1 号	Kansai	900	24. 1/593/593	2003
Maizuni 2 号	Kansai	900	24. 1/593/593	2003

20 世纪 70 年代以来,日本电网负荷峰谷差增大,加之带基本负荷的核电站的兴起,要求火电机组承担中间负荷,并能适应频繁快速启动的要求。20 世纪 80 年代以后,日本从欧洲引进了适合变压运行的螺旋管圈锅炉技术,自行开发了能带中间负荷滑压运行的超临界直流锅炉,使超临界机组不仅高效,而且具有与亚临界机组同样的运行灵活性,又由于采用了自动化的启停系统和汽轮机旁路,基本上解决了启动和变负荷运行慢的问题。自动化的启停系统同时监测锅炉和汽轮机关键部件的温度变化率,在保证没有额外寿命损失的条件下,获得最快的启动速度和最快的负荷变化率。

目前,日本新建的火电站以 500~1000MW 燃煤变压运行超超临界机组为主体,几乎都是变压运行机组,日本超临界机组已占其火电机组容量的 50% 以上。日本的超超临界机组以其可靠性高、经济性好、技术发展快跃居超超临界机组技术先进的国家。

日本的冶金技术处于世界领先地位,目前的开发目标是采用奥氏体钢和镍基合金,将蒸汽初压提高到 34.5MPa,初温提高到 625~640℃。

5. 欧洲超超临界机组发展

欧洲超临界机组大部分在德国、意大利、荷兰和丹麦,如表 1-3 所示。

表 1-3

欧洲近期投运的超超临界机组

电 厂	国 家	燃 料	容 量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/°C/°C/°C)	投运时间 (年)
Skaerbaek	丹麦	气	411	29.5/582/580/580	1997
Nordjylland	丹麦	煤	411	29.5/582/580/580	1998
Avedere	丹麦	气/煤	410	30/580/600	2000
Schwarze	德国	褐煤	450	28.5/545/560	1995
SchoPau Pumpe	德国	褐煤	874	25.3/545/560	1997
Boxberg	德国	褐煤	910	25.8/541/560	1999
Lippendorf	德国	褐煤	930	26/550/580	1999
Bexbach	德国	煤	750	25/575/595	1999
Niederausem	德国	褐煤	1025	26.5/576/599	2002

德国是发展超临界技术最早的国家之一，早在 20 世纪 50 年代和 60 年代就已经和美国同步地开展了超临界机组的研究工作，但其单机容量较小。1956 年参数为 29.3MPa/600°C（无再热）的 117MW 超临界机组投运，同年另一台蒸汽参数为 34MPa/610°C/570°C/570°C 容量为 88MW 的超超临界机组（二次再热）投运。1972 年投运了一台 430MW 超临界机组（蒸汽参数为 24.5MPa/535°C/535°C）。1979 年投运了一台二次再热的 475MW 超临界机组（蒸汽参数 25.5MPa/530°C/540°C/530°C）。

德国开发了螺旋管式水冷壁锅炉，实现了锅炉的滑压运行，这类锅炉目前在日本和欧洲的全滑压运行超临界机组中广泛应用。德国近年来很重视发展超临界机组，已投运和在建的超临界机组近 20 台，其中具有代表性的是 1992 年 8 月投运的斯道丁格电站 5 号机组，该机组容量为 535MW，参数为 26.2MPa/545°C/562°C，机组净效率可达 43%，1999 年在 Lippendorf 投运的容量为 930MW、蒸汽参数为 26.0MPa/550°C/580°C 的超超临界机组。2000 年在 Niederausen 电站投运的容量为 1025MW、蒸汽参数为 26.5MPa/576°C/599°C 的超超临界机组。在 Hessler 电站投运了容量为 700MW、蒸汽参数为 30.0MPa/580°C/600°C 的超超临界机组。

西门子公司在 1997~2001 年期间制造了 8 台功率在 750~1000MW、蒸汽参数为 25.5MPa/580°C/600°C 的汽轮机。在 20 世纪末设计的超超临界机组容量在 400~1000MW、蒸汽参数为 27.5MPa/589°C/600°C，机组净效率在 45% 以上。

丹麦 FLSmilj 公司研究开发的前 2 台超超临界机组，代表了当今世界火力发电的最高水平。1998 年在 NORDJYLLANDSVARKET 电站投运的机组容量为 411MW，过热蒸汽出口压力为 29MPa，二次中间再热，过热蒸汽和再热蒸汽温度为 582°C/580°C/580°C，机组效率为 47%，净效率为 45%（采用海水冷却，汽轮机背压为 2.6kPa）。后来于 2001 年投运的 1 台超超临界机组容量为 411MW，参数为 30.5MPa/582°C/600°C，该机组采用一次再热，效率高达 49%，这是目前世界上超超临界机组中热效率最高的机组。

近 10 年来，高效超临界技术在日本和欧洲得到迅速发展，投运的高效超临界机组取得了良好的运行业绩，其经济性、可靠性和灵活性得到认可，代表了当代火力发电技术的先进水平，因而极大地增强了各国发展更先进的高效超临界技术的信心。在已投运的高效超临界机组中，单机容量除了丹麦的 3 台为 400MW 等级以外，其余均在 700~1000MW 之间。由

于容量的进一步增大受到螺旋管圈水冷壁吊挂结构复杂化和管带过宽热偏差增大的限制。因此, 1000MW 被认为是螺旋管圈水冷壁单炉膛锅炉容量的上限。同时, 单机容量的进一步增大还要受到汽轮机的限制。

日本最初投运的两台高效超临界机组, 制造中仅仅提高了主蒸汽压力而未提高其温度, 由于主蒸汽压力和温度不匹配, 故采用两次再热以防汽轮机末级蒸汽湿度过高, 两次再热虽是成熟的技术, 但系统复杂。31.0MPa/566℃两次再热机组与 24.1MPa/566℃一次再热相比, 热效率提高 3%。采用 31.0MPa 主汽压力和两次再热, 机组制造成本明显提高, 缺乏市场竞争力。所以, 近年来各公司都转为生产 24.5MPa/600℃/600℃等级的高效超临界机组, 其热效率仅比 31.0MPa/566℃两次再热低 0.5%, 制造成本则大大降低。

欧洲高效超临界机组的发展也大致经历了这一过程。丹麦在 20 世纪 90 年代末投运的 2 台高效超临界机组, 采用了 29.0MPa/580℃的蒸汽参数, 两次再热。而欧洲在建中的高效超临界机组也都改为采用一次再热, 与日本不同的是主汽压力和温度都进一步提高 (30.5MPa/580℃/600℃), 其热效率与 29.0MPa/580℃两次再热机组基本相同。应该说, 现已建成的高效超临界机组尚属过渡型, 随着材料技术的发展, 各国计划在未来 10~20 年间将开发蒸汽初参数更高的两次再热高效超临界机组, 并正在付诸实施。

6. 国外超超临界机组发展的特点

分析国外超超临界机组发展的历程和现状, 可以看出具有如下特点。

(1) 早期 (20 世纪 50 年代末) 以美国为代表, 更注重提高初压 (30MPa 或以上), 并采用二次再热。结构与系统趋于复杂, 运行控制难度较高, 机组可用率也较低。因此, 美国只生产了 3 台便停止生产。20 世纪 80 年代又回到超临界参数。

(2) 中期 (20 世纪 80 年代末) 以日本川越电站 31MPa/566℃/566℃/566℃超超临界机组为代表, 走了一条从引进、自主开发到不断改进完善的发展之路。

(3) 近期 (20 世纪 90 年代至今), 日本超超临界参数, 压力调整为 24~25MPa, 温度由 566℃/593℃稳步上升为 600℃/600℃的发展方向, 取得成功; 德国等主要欧洲国家超超临界机组的压力在 25~28MPa 范围, 温度上升为 580℃/600℃; 丹麦的超超临界机组追求技术上可能达到的最高效率, 压力接近 30MPa, 温度为 580℃/580℃/580℃或 580℃/600℃, 目前又倾向于一次再热。

(4) 采用二次再热的超超临界机组, 除了早期美国的 3 台外, 只有日本川越 (1989) 和丹麦的机组。采用二次再热可使机组的热效率提高 1%~2%, 但也造成了调温方式、受热面布置、结构等的复杂性, 成本明显提高。因此除早期投运的少数超超临界机组外, 无论是日本还是欧洲都倾向于采用一次再热。

(5) 20 世纪中期以来, 欧洲国家在建设大容量火电机组时, 以追求机组的高效率为主要目标, 在提高蒸汽温度的同时, 压力也随之提高, 主蒸汽压力为 25~28MPa, 主蒸汽温度多为 580℃, 再热蒸汽温度为 580~600℃, 大多采用一次再热。而日本的超超临界机组在大幅度提高机组容量时, 主要是提高机组的蒸汽温度, 蒸汽压力基本保持在 25MPa。选择采用较低的蒸汽压力和较高的蒸汽温度主要是基于技术经济的考虑。

(6) 锅炉布置按各公司的技术传统, 有 Π 型布置及塔式布置。日本超超临界机组全部采用 Π 型布置, 德国、丹麦全部采用塔式布置。

(7) 锅炉燃烧方式按各公司的技术传统, 有切圆燃烧和对冲燃烧。日本 IHI、日立公司

制造的超超临界Ⅱ型锅炉均采用了前后墙对冲燃烧方式；三菱重工的锅炉燃烧方式为单炉膛或双炉膛燃烧方式，两种燃烧方式都可以减少炉膛出口烟温偏差。德国、丹麦等欧洲的超超临界塔式锅炉不存在烟温偏差问题，燃烧方式既有四角切圆燃烧，又有对冲燃烧，个别的还有双切圆燃烧和八角切圆燃烧。

(8) 锅炉水冷壁形式为垂直管屏和螺旋管圈两种类型并存。美国早期为垂直管屏，欧洲为螺旋管圈。20世纪90年代后，除日本三菱公司开发了内螺纹垂直管屏外，其余全部采用螺旋管圈。

(9) 已投运的超超临界1000MW机组以双轴机组居多，但随着汽轮机超长末级叶片的开发应用，大容量单轴机组已成为发展的新趋势。

二、国内超超临界机组发展

我国电力工业总体水平与国外先进水平相比有较大差距，能耗高和环境污染严重是目前我国火电厂中存在的两大突出问题，并成为制约我国电力工业乃至整个国民经济发展的的重要因素。

国外在发展超超临界火电机组方面已经取得了很大进展，技术日益成熟，并被广泛应用，取得了显著的节能和环保效益。为迅速扭转我国火电机组煤耗长期居高不下的局面，缩小我国火电技术与国外先进水平的差距，发展高效、节能、环保的国产大容量的超（超）临界火电机组是十分必要的。

我国自20世纪90年代开始引进超临界机组，600MW超临界机组在上海石洞口第二发电厂于1992年投入运行以来，克服了许多技术上的难关，机组达到设计指标，经济效益良好。20世纪90年代以来，国内引进的多台300、500、600、800MW等超临界火电机组也投运良好，取得了一些重要的调试和运行经验。近几年来国内三大动力集团在电站设备设计和制造方面的技术、经验、能力和技术装备水平等都有了很大的提高。所有这些，都为加速我国大型超临界火电机组的研制步伐和实现批量生产，提供了必要的条件和基础。

通过引进、消化、吸收，我国基本掌握了超临界机组的设计、制造、建设、调试、运行、检修、管理技术，积累了丰富的应用经验，锻炼和培养出了一批技术人才，为我国超超临界机组的发展奠定了良好的基础。目前，我国发电设备制造水平通过与国外合作，应用国外先进成熟技术进行超超临界机组的设计和制造，已经接近世界先进水平，但在超超临界机组的新材料开发等方面与先进国家的差距仍较大。

1. 我国超超临界机组建设情况

1992年我国首台600MW超临界机组（参数24.2MPa/538℃/566℃）在石洞口第二发电厂投入运行。

2004年，我国首台国产化依托工程超临界机组（参数24.2MPa/566℃/566℃）在华能沁北电厂投入运行。

2006年底，我国共有47台超临界、超超临界机组投运，容量为27680MW，占当年火电装机容量的5.7%。

2007年8月，我国首台600MW超超临界机组（参数25MPa/600℃/600℃）在华能营口电厂投入运行。

2006年11月，我国首台1000MW超超临界机组（参数26.25MPa/600℃/600℃）在玉环电厂投入运行。