

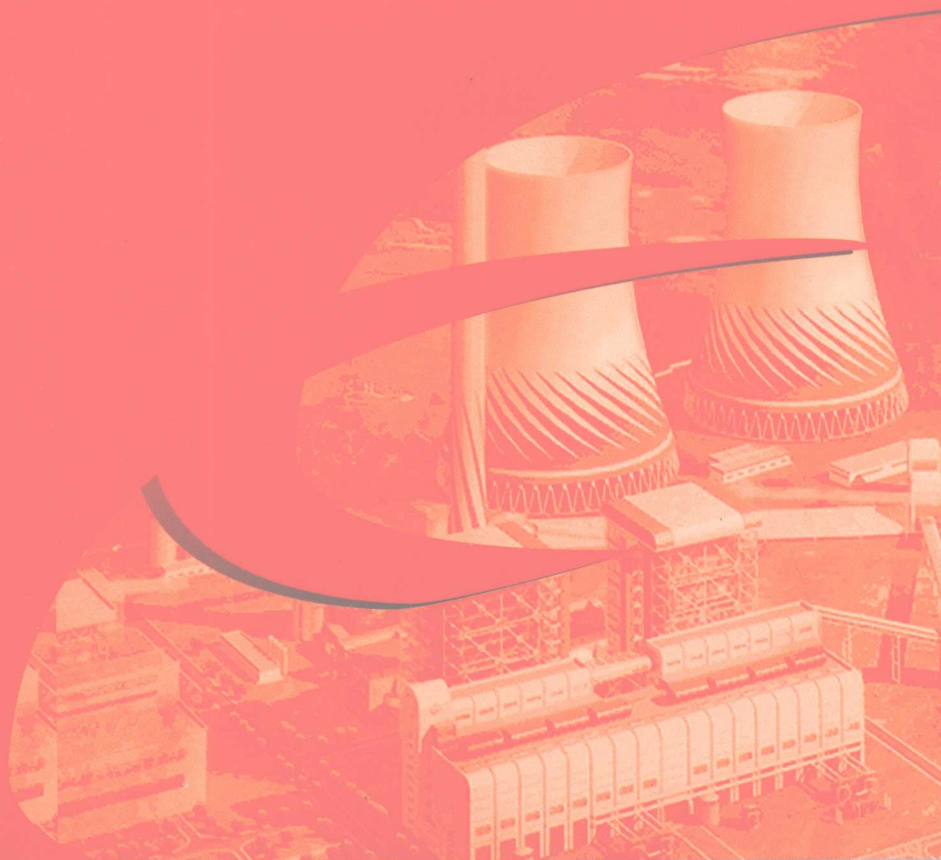


超超临界火力发电机组技术丛书

CHAOCHAO LINJIE HUOLI FADIANJIZU JISHU CONGSHU

# 超超临界机组 锅炉设备及系统

朱全利 主编



化学工业出版社



超超临界火力发电机组技术丛书

# 超超临界机组 锅炉设备及系统

● 朱全利 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

ISBN 7-122-11212-9

本书是《超超临界火力发电机组技术丛书》的第一分册。全书详细介绍了我国引进型超超临界锅炉的基本形式、构造和发展,超超临界锅炉的水动力特性、热化学问题;详细地阐述了超超临界锅炉的启停、停运、运行调整和运行操作、故障处理等问题。

本书可供从事超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材和高等院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

超超临界机组锅炉设备及系统/朱全利主编. —北京:  
化学工业出版社, 2008.5

(超超临界火力发电机组技术丛书)

ISBN 978-7-122-02725-2

I. 超… II. 朱… III. 火电厂-锅炉 IV. TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第063166号

责任编辑:郑宇印 戴燕红  
责任校对:凌亚男

文字编辑:闫敏  
装帧设计:于兵

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 字数430千字 2008年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

## 《超超临界火力发电机组技术丛书》编委会

主 任：胡念苏

副 主 任：朱全利 肖大维 熊立红 毛慧和

编委会委员（按姓氏拼音排序）：

蔡 锴	陈汝庆	陈远楚	樊天竞
胡念苏	刘先斐	刘 勇	毛慧和
盛赛斌	王建梅	王育波	肖大维
熊立红	熊杨恒	杨 俊	俞红梅
袁立红	张世容	朱全利	

# 前 言

全世界能源的日益紧张以及对环境保护要求的日益严格,促使火力发电机组采用更高的参数、更大容量以获得更佳效率,也能相对更有效地减少对环境的污染。同时,新技术、新材料领域的成果也为高参数机组的制造和应用提供了条件。事实上,自从锅炉、汽轮机成为大规模火力发电的主要动力机械以来,其发电机组一直沿着不断提高蒸汽参数、增大单机功率、改进材料性能和制造工艺、提高自动化水平的方向发展。其经济性、安全性、可靠性、清洁性、灵活性以及自动化程度都在得到不断的改善。

火力发电机组采用超超临界技术是提高汽轮发电机组经济性的有效手段,与同容量亚临界和常规超临界火电机组比较,超超临界机组的效率有明显的提高。我国超临界和超超临界机组已经成为今后一个时期火力发电机组建设的重点,同时正在加快进行超临界和超超临界机组制造、运行中的关键技术研究。2006年11月和12月,华能玉环发电厂和华电国际邹县发电厂的1000MW超超临界发电机组分别建成投产,标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

为满足广大技术人员和现场生产人员了解引进型超超临界火力发电机组的结构、运行、系统等知识的需要,我们组织人员编写了这套《超超临界火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《超超临界机组锅炉设备及系统》、《超超临界机组汽轮机设备及系统》、《超超临界机组电气设备及系统》、《超超临界机组控制设备及系统》、《超超临界机组烟气净化设备及系统》五个分册。

本丛书可供从事超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材和高等院校相关专业师生的参考书。

《超超临界机组锅炉设备及系统》是本丛书的第一分册。全书详细介绍了我国三大动力集团引进技术生产的1000MW超超临界锅炉及其系统、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及系统,锅炉的辅助设备及系统,锅炉的运行等。

本分册由武汉大学朱全利主编,参加编写的人员有武汉大学的朱全利(编写第一、二、四、九、十和十一章),熊扬恒(编写第三章),喻红梅(编写第五、七章),熊立红(编写第六、八章)。

武汉大学胡念苏教授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,参阅了书后列出的参考文献以及机关电厂、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,得到这些单位的大力支持,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,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2008年3月

# 目 录

第一章 概述 .....	1
第一节 超超临界锅炉的发展现状与趋势 .....	1
第二节 超超临界锅炉机组的技术特点 .....	6
第三节 超超临界锅炉工作原理及基本形式 .....	10
第四节 国产超超临界机组锅炉 .....	13
第二章 燃料燃烧及燃烧设备 .....	19
第一节 煤粉锅炉燃烧设备 .....	19
第二节 旋流煤粉燃烧器 .....	22
第三节 直流煤粉燃烧器 .....	29
第四节 煤粉炉的点火装置 .....	35
第五节 锅炉高效低 NO <sub>x</sub> 燃烧技术 .....	41
第三章 煤粉制备及设备 .....	48
第一节 煤粉的性质 .....	48
第二节 煤的可磨性系数 .....	51
第三节 制粉系统 .....	52
第四节 磨煤机 .....	55
第五节 制粉系统的其它设备及部件 .....	74
第四章 超超临界锅炉的水冷壁 .....	79
第一节 概述 .....	79
第二节 水冷壁结构 .....	81
第三节 水冷壁的管壁温度 .....	94
第四节 直流锅炉的水动力不稳定性 .....	98
第五节 直流锅炉蒸发受热面中流体的脉动 .....	103
第六节 直流锅炉蒸发受热面中的热偏差 .....	104
第七节 直流锅炉蒸发受热面的传热恶化现象 .....	107
第五章 超超临界锅炉过热器和再热器 .....	112
第一节 概述 .....	112
第二节 过热器和再热器的结构及工作特性 .....	113
第三节 超超临界锅炉的过热器和再热器系统 .....	116
第四节 汽温特性及汽温调节 .....	124
第五节 过热器的热偏差 .....	129
第六节 受热面沾污、高温腐蚀及高温破坏 .....	132
第六章 超超临界锅炉省煤器和空气预热器 .....	135
第一节 概述 .....	135

第二节	省煤器 .....	135
第三节	空气预热器 .....	137
第四节	容克式空气预热器的维护 .....	143
<b>第七章</b>	<b>超超临界锅炉热化学问题 .....</b>	<b>147</b>
第一节	概述 .....	147
第二节	直流锅炉内盐分的溶解与杂质的沉淀 .....	147
第三节	直流锅炉的锅内腐蚀 .....	152
第四节	超超临界锅炉的给水标准 .....	155
第五节	直流锅炉的水处理 .....	158
第六节	直流锅炉的清洗 .....	160
<b>第八章</b>	<b>超超临界锅炉用风机 .....</b>	<b>163</b>
第一节	概述 .....	163
第二节	上鼓动叶可调轴流式送风机 .....	167
第三节	AN 静叶可调轴流式引风机 .....	179
第四节	ANN 动叶可调轴流式风机 .....	186
第五节	轴流式风机的运行问题 .....	192
<b>第九章</b>	<b>超超临界锅炉的启停 .....</b>	<b>194</b>
第一节	概述 .....	194
第二节	直流锅炉的启动特性 .....	195
第三节	超(超)临界锅炉的启动旁路系统 .....	197
第四节	超超临界锅炉的启动 .....	203
第五节	超超临界锅炉的停炉和停用保护 .....	216
<b>第十章</b>	<b>锅炉的正常运行及调整 .....</b>	<b>222</b>
第一节	锅炉运行调整的任务 .....	222
第二节	直流锅炉状态参数特性 .....	222
第三节	直流锅炉蒸汽参数调节的原理 .....	225
第四节	超超临界锅炉的运行调节 .....	228
第五节	超超临界锅炉的控制 .....	230
第六节	DG3000/26.15-II 1 型锅炉运行调整 .....	239
<b>第十一章</b>	<b>锅炉常见故障及处理 .....</b>	<b>243</b>
第一节	受热面损坏 .....	243
第二节	锅炉灭火与烟道再燃烧 .....	248
第三节	锅炉事故处理规范 .....	251
第四节	锅炉典型事故解析 .....	256
<b>参考文献</b>	.....	<b>264</b>



# 第一章 概述

今后 20~30 年内,世界主要能源仍将以化石燃料为主,为缓解利用化石燃料造成的环境污染,要求更加广泛地使用电力。我国电力工业主要以火力发电(燃煤)机组为主,为解决燃煤机组相对来说效率低、污染物排放量大的问题,发展大容量、高参数以及高效低污染的常规机组是我国电力工业发展的途径之一。目前,我国电力工业正向高效、节能和环保的能源洁净利用方向发展,对煤炭的高效洁净利用的需求尤为突出,因此,超超临界机组是实现高效、大规模利用煤炭的最重要手段之一。

## 第一节 超超临界锅炉的发展现状与趋势

### 一、国内外超超临界机组发展现状

(1) 国外超超临界机组发展情况 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 年代以后,随着金属材料的发展,辅机及系统方面的成熟,超临界技术得以迅速发展。据不完全统计,目前,美国有 169 台超临界机组,俄罗斯 224 台,日本 94 台,德国 10 余台,意大利 13 台,南非、澳大利亚均有超临界机组。单机最大容量已达 1200~1300MW。经过四十多年的不断完善和发展,目前超临界机组已进入成熟和实用阶段,超超临界参数的机组也已经成功地投入商业运行。

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,降低了机组运行可靠性水平。但以后陆续投运的机组中在降低了蒸汽参数后,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。据统计,截至 1985 年,美国绝大多数超临界机组的主蒸汽参数为 24.13MPa、主蒸汽温度和再热温度为 538~566℃。1990 年前后,超临界机组的温度和压力又趋于提高。

俄罗斯超临界机组的研制主要立足于国内自主开发。1963 年投运首台 300MW 超临界机组,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 300MW、500MW、800MW、1200MW 等 4 个容量等级,参数基本保持在 23.5MPa、540℃/540℃。超临界机组占火电容量 50%以上,最大单机容量为 1200MW。目前俄罗斯的圣彼得堡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,预计电站的效率为



44%~46%。

日本发展超临界机组虽然起步较晚（20世纪60年代中期），但发展快、收效大。其采取引进、仿制、创新的技术路线，与俄罗斯形成鲜明的对比。日本于1967年从美国进口首台600MW超临界机组，两年后仿制的同型机组就已投运；而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。20世纪80年代以后，日本吸取了欧洲的经验，自行开发了能带中间负荷滑压运行的超临界直流锅炉。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。目前，日本超临界机组已占其火电容量的50%以上，最大单机容量为1000MW。而且开始向更高参数发展，蒸汽温度多在566~593℃的范围内。1989年日本投运了世界上第1台采用超超临界参数的川越电厂1号机组，其主蒸汽压力为31MPa，温度为566℃/566℃/566℃（二次再热）。

德国也是发展超临界技术最早的国家之一，但其单机容量较小。1956年参数为29.3MPa、600℃（无再热）的117MW超临界机组投运，1972年首台430MW（24.5MPa、535℃/535℃）超临界机组投运。德国近年来很重视发展超临界机组，目前最具有代表性的是1992年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℃/562℃，机组净效率可达43%。

丹麦NORDJYLLANDSVARKET电站1998年投运1台容量为400MW、29MPa、二次再热、主蒸汽和再热蒸汽温度为580℃/580℃/580℃的超临界机组，在凝汽器压力为2.1kPa时，机组效率高达47%。丹麦于2001年投运的1台超临界机组效率高达49%，这是目前世界上已知的超临界机组中运行效率最高的机组。

国际上通常把主蒸汽压力在28MPa以上和主蒸汽、再热蒸汽温度在580℃及其以上的机组定义为高效超临界（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。

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主蒸汽压力和两次再热，机组制造成本显著提高，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,与日本不同的是主蒸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。

(2) 国内超超临界机组发展情况 我国自20世纪80年代开始引进超临界压力机组,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。

由于煤炭在一次能源结构中的主导地位,决定了电力生产中以煤炭为主的格局。根据我国能源资源的特点,煤炭在一次能源生产与消费中的比例将会长期保持在75%左右,而且这一比重在将来的几十年内不会有根本性的变化。在中国电力工业中,自1990年以来,火电机组装机容量保持在75%左右。火电机组的发电量占总发电量的80%以上,其中燃煤电站占总发电量的76%。目前,我国发电消耗的煤炭约占煤炭总产量的40%以上,且这一比例还会逐年上升。

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。因此,在增产煤炭的同时,必须重视节约发电用煤工作,提高机组的热效率以实现节能降耗及降低污染物排放。

国外在发展先进的大型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,发展国产大容量的超临界火电机组是十分必要的。发展高效、节能、环保的超临界火力发电机组势在必行。

前几年国内引进的多台300MW、500MW、600MW、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进步和发展。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。

世界各国超临界机组的起步容量各有不同,如俄罗斯定为300MW,日本定为450MW。目前600MW级机组在技术上也属于成熟产品,考虑到国内原有5个大电网对单机容量600MW的需求和国内已有亚临界600MW火电机组产品的实际情况(有些配套可以通用),我国发展超临界火电机组的起步容量定为600MW;从技术性、经济性以及机组配用材料方面考虑,参数初步定为压力24~25MPa、温度538~566℃、一次再热。

目前,我国已有数台600MW和1000MW级超超临界机组正式投产,全国还有大量的600MW和1000MW级超超临界机组正在建设和拟建中。

## 二、超超临界火电技术的发展业绩

据统计,目前全世界已投产的超临界及以上参数的发电机组大约600多台。其中美国有170多台,日本约60台,欧洲280余台;目前发展超超临界技术领先的国家主要是日本、德国等。近年来,在欧洲和日本投运的超超临界机组见表1-1和表1-2。

美国是世界上发展超临界机组最早的国家,早在20世纪50年代就开始了超超临界机组的研究。目前美国超超临界机组在数量上居世界第二位,并拥有9台世界上最大的机组,单机容量为1300MW,见表1-3。

表 1-1 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	投运时间/年
Skaerbaek	丹麦	气	411	29MPa/582℃/580℃/580℃	1997
Nordjylland	丹麦	煤	411	29MPa/582℃/580℃/580℃	1998
Avedore	丹麦	气/煤	410	30MPa/580℃/600℃	2000
Schwareze	德国	褐煤	450	28.5MPa/545℃/560℃	1995
SchoPau Pumpe	德国	褐煤	874	25.3MPa/545℃/560℃	1997
Boxberg	德国	褐煤	910	25.8MPa/541℃/560℃	1999
Lippendorf	德国	褐煤	930	26MPa/550℃/580℃	1999
Bexbach	德国	煤	750	25MPa/575℃/595℃	1999
Niederausem	德国	褐煤	1025	26.5MPa/576℃/599℃	2002

表 1-2 日本 1989 年以来投运的主要超（超）临界机组

电 厂	电力公司	容量/MW	蒸汽参数	投运时间/年
KAWAGOE 1#	Chubu	700	31MPa/566℃/566℃/566℃	1989
KAWAGOE 2#	Chubu	700	31MPa/566℃/566℃/566℃	1990
Hekinann 3#	Chubu	700	24.6MPa/538℃/593℃	1993
Noshiro 2#	Tohoku	600	24.6MPa/566℃/593℃	1994
Nanao-Ohta 1#	Hohuriku	500	24.6MPa/566℃/593℃	1995
Reihoku 1#	Kyushu	700	24.1MPa/566℃/566℃	1995
Haramachi 1#	Tohoku	1000	25MPa/566℃/593℃	1997
Matsura 2#	EPDC	1000	24.6MPa/593℃/593℃	1997
Misumi 1#	Chugoku	1000	25MPa/600℃/600℃	1998
Haramachi 2#	Tohoku	1000	25MPa/600℃/600℃	1998
Nanao-Ohta 2#	Hohuriku	700	24.6MPa/593℃/593℃	1998
Hekinann 4#	Chubu	1000	24.6MPa/566℃/593℃	2001
Hekinann 5#	Chubu	1000	24.6MPa/566℃/593℃	2002
Tsuruga 2#	Hohuriku	700	24.6MPa/593℃/593℃	2000
Tachibana-wan	Shikoku	700	24.6MPa/566℃/593℃	2000
Karita 1# (PFBC)	Kyushu	350	24.6MPa/566℃/593℃	2000
Reihoku 2#	Kyushu	700	24.6MPa/593℃/593℃	2003
Tachibana-wan 1#	EPDC	1050	25MPa/600℃/610℃	2000
Tachibana-wan 2#	EPDC	1050	25MPa/600℃/610℃	2001
Isogo	EPDC	600	25.5MPa/600℃/610℃	2002
Hitachbana 1#	Tokyo	1000	24.5MPa/600℃/600℃	2002
Maizuni 1#	Kansai	900	24.1MPa/593℃/593℃	2003
Maizuni 2#	Kansai	900	24.1MPa/593℃/593℃	2003

表 1-3 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	投运时间/年
Cumberland	4535	定压	24.2MPa/538℃/538℃	1972
Amos	4433	定压	24.2MPa/538℃/538℃	1973
Gavin	4433	定压	24.2MPa/538℃/538℃	1974
Mountaineer	4433	定压	24.2MPa/538℃/538℃	1980
Zimmer	4433	定压	25.2MPa/538℃/538℃	1991

截至 2006 年底,我国有 47 台超(超)临界机组投运,容量达 27680MW。1992 年我国首台 600MW 超临界机组(参数 24.2MPa、538℃/566℃)在石洞口二厂投入运行。2004 年,我国首台自行生产的 600MW 超临界机组在沁北电厂投入运行。2007 年,我国首台 600MW 超超临界机组在营口电厂投入运行。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,2006 年 12 月,邹县电厂 1000MW 超超临界机组(参数 26MPa、600℃/600℃)投入运行。至 2007 年 9 月,我国共有 4 台 1000MW 超超临界机组投入运行。

### 三、超临界火电技术的发展趋势

为进一步降低能耗和减少 CO<sub>2</sub> 排放,改善环境,在材料技术发展的支持下,超临界机组正朝着更高参数的超超临界方向发展。目前高参数的超临界机组已达到成熟、高效和商业化程度,其最大容量已达 1300MW,最高效率达 49%,具有极高的推广前景。超超临界机组技术也正趋于成熟,国外超超临界机组发展的近期目标为 1000MW 级机组,参数为 31MPa、600℃/600℃/600℃,并正在向更高的水平发展。一些国家和制造厂商已经公布了发展下一代高效超临界机组的计划,蒸汽初温将提高到 700℃,再热汽温达 720℃,相应的压力也将从目前的 30MPa 左右提高到 35~40MPa,机组供电效率有望达到 50%~55%。

在欧洲的“THERMIE”计划中目前正在支持旨在推动欧洲发展超临界火电技术的项目“ADVANCED (700℃) PFPOWERPLANT”(即先进的“700℃”PF 电厂),该项目主要有两个目标:使燃烧粉煤(PF)电厂的净效率由 47%提高到 55%(对低温海水作冷却水)或 52%左右(对于内陆地区和冷却塔);降低燃煤电站的造价。欧洲各国约有 40 个单位参加了这个项目的的工作,其中有 26 家是设备制造商(包括汽轮机、锅炉、主要辅机和材料等制造商),其它则分别是有关的研究机构、大学、电力公司等部门。该项目从 1998 年开始,分为 8 个阶段,预计在 2014 年完成。在此还应特别说明的是,根据世界上先进的超临界电站的发展经验,机组效率的提高可能来源于许多方面的因素,如:较低的锅炉排烟温度,高效率的主、辅机设备,煤的良好燃烧,较高的给水温度,较低的凝汽器压力,较低的系统压损,蒸汽再热级数等。据国外研究报告估计,仅由于提高蒸汽参数而提高的效率最多为效率总提高量的一半左右。因此,要使超临界机组和超超临界机组真正达到高效,不能仅靠简单地提高蒸汽参数来实现,还必须同时注重其它相关技术的开发和研究。

从原理上说,对于利用蒸汽循环发电的任何技术都可以采用超临界技术。因此,目前的 IGCC(整体煤气化联合循环发电)技术、FBC(流化床燃烧)技术、燃气轮机联合循环发电技术以及任何与余热锅炉有关的技术均可采用超临界技术。当然,为了达到商业上可行的目的,这类采用超临界参数的发电方式在技术上不仅要能产生高温蒸汽,同时还需具备一定

的容量规模。据国外研究报告介绍,随着 FBC 和联合循环燃气轮机技术的进步,机组容量增加,余热锅炉的温度也相应提高,在今后的 5~15 年内,其超临界形式可能会实现商业化。据介绍,EDF 公司正在进行 600MW、蒸汽参数为 27MPa、600℃/600℃、给水温度为 290℃ 的超临界 CFB(循环流化床)锅炉的设计。日本正在 KARI TA 电站建造 350MW 的超临界循环的 PFB(增压流化床)锅炉机组,蒸汽参数为 24.6MPa、569℃/568℃,所有蒸发、过热和再热均在浸没于鼓泡流化床内的管束中进行。同时,IGCC 采用超临界技术仍然是未来目标。

由于煤可以远距离运输,且能大量储存,在燃料供应上具有极好的安全保证,所以燃煤发电技术具有较强的优势。面向 21 世纪,对于燃用化石燃料,特别是燃煤机组,超临界发电技术仍是一种重要的技术选择,因此具有广阔的发展前景。

## 第二节 超超临界锅炉机组的技术特点

### 一、超超临界火电机组的参数、容量及效率

水的临界状态点的参数为 22.115MPa、374.15℃。理论上认为,在水的状态参数达到临界点时,水完全汽化会在一瞬间完成,即在临界点时,在饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽、水共存的两相区存在,二者的参数不再有区别。与较低压力下水的特性不同,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。对水蒸气动力装置循环理论分析表明,提高循环蒸汽的初参数和降低循环的终参数都可以提高循环的热效率。除此之外,采用再热循环和回热循环也可以提高循环的热效率。

实际上,蒸汽动力装置的发展和进步一直是以提高参数为目的的。另外,在蒸汽参数相同的情况下,机组容量增加,其热耗率会有所降低。在机组容量一定的情况下,蒸汽参数的提高虽然会提高循环热效率,但由于这时蒸汽压力升高、质量热容减小,有可能会对汽轮机的高压缸内效率带来不利影响。因此,在实际中或许会有一个“最小经济容量”的问题,即在机组容量小于“最小经济容量”的情况下,采用超临界参数有可能是 不经济的。

事实表明,提高蒸汽参数并与发展大容量机组相结合是提高常规火电厂效率及降低单位容量造价最有效的途径。与同容量亚临界火电机组的热效率相比,在理论上采用超临界参数可提高效率 2%~2.5%,采用超超临界参数可提高 4%~5%。目前,世界上先进的超临界机组效率已达到 47%~49%。

### 二、超超临界火电机组的运行灵活性与可靠性

目前先进的大容量超临界机组具有良好的启动、运行和调峰性能,能够满足电网负荷的调峰要求,并可在较大的负荷范围(30%~90%额定负荷)内变压运行,变负荷速率多为 5%/min。美国《发电可用率数据系统》1980 年的分析报告中公布了 71 台超临界机组和 27 台亚临界机组的运行统计数据,表明这两类机组的平均运行可用率、等效可用率和强迫停运率已无差别。据美国 EPRI 的统计,容量为 600~835MW、具有二次中间再热的超临界机组整机可用率已达 90%,1300MW 二次中间再热的燃煤超临界机组整机可用率为 92.3%,有的还要高一些;有 1 台 ABB 公司制造的 1300MW 超临界机组甚至创造过安全运行 605 天的记录。同时,从国内引进的几台超临界机组的运行情况看,也说明了这一点,即目前投运的



超临界机组的运行可靠性指标已经不低于亚临界机组，有的甚至更高。

### 三、超超临界机组的投资造价比较

提高蒸汽参数将使机组的初投资有所增加，这是因为压力提高后很多设备和主蒸汽管道的壁厚要相应增加，或者说要选用性能和价格更高一些的材料；而温度提高后则需要使用更多价格昂贵的合金钢材。一般认为超临界机组的造价比亚临界机组大约增加3%~10%。但由于世界各国的具体情况不同，且各个电站的设计和辅机配套方案等也有所不同，因此，造价增加的幅度不同。

由于电厂的运行成本主要取决于燃料成本，因超临界机组的效率较高，可抵偿一些造价略高的影响，所以运行成本有可能比亚临界电厂低。许多专家认为，当煤价超过30美元/t，就应当采用超临界机组；而在煤价较低的地区采用亚临界机组仍然较为合适。如果考虑到污染排放收费的情况，或许该煤价还应再低一些。此外，在进行不同方案的综合技术经济比较和分析时，可能还有其它一些因素也值得考虑，比如电站所处的地理位置、电网的负荷率、上网电价以及环保因素等。

### 四、炉型

欧洲的超超临界锅炉均采用塔式布置，其优点是水冷壁（尤其是上炉膛）回路简单，不仅炉膛各墙水冷壁间热力与水动力偏差小，而且后水冷壁回路也特别简单，烟气自下向上垂直流动，消除了Ⅱ型锅炉中因有二次90°转弯（炉膛出口和尾部转向室）而导致的烟侧偏差，此外对减轻对流受热面的结渣和烟侧磨损也是有利的。缺点是：锅炉较高，增加了安装难度，四根大立柱承受锅炉全部荷载，对柱基础的设计要求较高，增加了锅炉房地基的费用。

日本的超超临界锅炉均采用双烟道的Ⅱ型布置，其主要优点是锅炉高度稍小，易于安装；缺点是水冷壁特别是上部后水冷壁的回路较复杂，其热力与水力偏差稍大，过热器与再热器沿炉宽方向的烟侧偏差稍大；转向室后的低温对流受热面存在局部烟侧磨损的可能性。

总之，两种炉型代表了不同的设计传统，均有其优缺点，只要设计合理，均能保证锅炉的可靠运行。

### 五、燃烧方式与炉膛尺寸

目前世界上已投运百万千瓦等级燃煤超超临界锅炉，就其燃烧方式而言，仍分切向燃烧和对冲燃烧两大类，而在切向燃烧方式中又分单切圆和双切圆两种，德国、丹麦等欧洲国家均采用单切圆正方形炉膛，能保证较好的燃烧效果和炉内空气动力场，已投运的最大的正方形炉膛为德国 Schwarze Pump 的800MW褐煤炉，其截面尺寸为24m×24m，其次为 NiedrauBen 的900MW褐煤炉，其尺寸为23.16m×23.16m，均已顺利运行，说明百万级单切圆正方形炉膛是可行的，在直流燃烧器的火焰穿透能力及燃烧组织方面未出现任何问题。

三菱公司为了消除Ⅱ型布置单切圆燃烧沿炉宽方向水冷壁、高温过热器和再热器的烟侧偏差，改善切向燃烧炉膛内的空气动力场，从20世纪80年代末开始采用旋转方向相背的双切圆矩形炉膛，已为十余台容量为700~1000MW的超临界和超超临界锅炉所采用，并取得了良好的运行业绩。

日立和石川岛播磨两家公司的超临界和超超临界锅炉均采用旋流式燃烧器前后墙对冲布置，均有良好的运行业绩，也均采用矩形炉膛，对于百万千瓦级的燃煤锅炉，其炉宽可达30m，因此对长伸缩式吹灰器的工作性能有很高要求。

为了降低NO<sub>x</sub>生成量，所有投运的超超临界锅炉的炉膛均采用了分级燃烧，ALSTOM公司烟煤超临界锅炉运行中的NO<sub>x</sub>生成量可达到240mg/m<sup>3</sup>，日本三菱生产的1000MW超超临

界锅炉（三隅电厂1#炉）燃用澳大利亚烟煤时在锅炉出口测得的 $\text{NO}_x$ 生成量仅为137ppm（1ppm= $1 \times 10^{-6}$ ，下同），而在脱硝装置后测得的 $\text{NO}_x$ 量又降到30ppm，因此为了满足对火力发电厂日益严格的环保要求，绝大部分超超临界锅炉均采用分级燃烧和脱硝装置。

## 六、水冷壁系统

已投运的超超临界锅炉的水冷壁大多数为下炉膛采用螺旋管圈，上炉膛采用垂直管圈，如ALSTOM（EVT）、日立、石川岛播磨等公司，其优点是水冷壁沿炉膛四周热偏差较小，对煤种和燃烧方式变化的敏感性较小，也不需采用内螺纹管和节流孔圈。主要缺点是水冷壁阻力较大，但各锅炉制造商为了降低厂用电耗，近年来采用了所谓低阻力的螺旋管圈水冷壁，即适当加大螺旋倾角，在保证运行可靠的前提下，适当降低质量流速；另外，日立BHK开发了在燃烧器高热负荷区采用内螺纹管的螺旋管圈水冷壁。

20世纪80年代末以来，日本三菱公司首创了用节流圈调节一次上升垂直内螺纹管圈水冷壁，其突出优点是可以采用较低的质量流速，阻力较低；易于制造和安装，从结渣角度看，螺旋管圈易于导致黏结灰渣，而垂直管水冷壁不易结渣，吹灰器的效果也较螺旋管圈为好。从水动力特性角度出发，垂直水冷壁具有始终保持正向流动的优点，即具有部分自然循环炉的自补偿能力。缺点是：由于水冷壁较细和垂直上升，因此对煤种的变化和炉内空气动力场及温度场的变化较为敏感，另外，为装设节流孔圈，需采用大直径的水冷壁下集箱，针对上述缺点和根据运行经验，日本三菱公司近年来对垂直管圈水冷壁作了两项改进；取消大直径的水冷壁下集箱，节流孔圈装于下集箱进口管子上，便于安装和调试；同时为了减少水冷壁出口温度偏差，已加装了中间混合集箱。

Mitsui Babcock公司在生产传统的螺旋管圈直流炉的基础上，研究开发了低质量流速的垂直管圈直流炉。并认为后者是目前最佳可用技术。垂直管圈的优点有：正的流量特性，本生负荷降低到20%，从而使锅炉具有更好的运行特性；不需要辅助支吊系统，管间温差较小，从而使锅炉初投资较低；压降小，使得动力消耗少，管子容易更换，从而使运行费用较低。综合以上优点，采用垂直管圈锅炉的电厂可以进一步降低发电成本。河南姚孟电厂1#炉的改造选择了Mitsui Babcock公司的垂直管圈直流炉，成为世界上第一台低质量流速的垂直管圈直流炉，具有正的流量特性。

Mitsui Babcock公司参加欧盟支持的ISB-2000计划，开发适合发展中国家的设计，考虑到现有材料的限制，优化蒸汽参数，进行了600MW级的300bar（1bar= $10^5$ Pa）、600℃/620℃的螺旋管圈、垂直内螺纹管圈水冷壁锅炉和新奇炉型（卧式垂直内螺纹管圈锅炉）的设计。

## 七、锅炉受压件钢材

由于超超临界机组主汽和再热汽温度由超临界锅炉的538~566℃提高到580℃以及近几年的600℃及600℃以上，因此锅炉高温受热面不仅要求有高热强性即高温下的高蠕变强度和持久强度，而且还应具有优良的抗烟侧高温腐蚀和抗蒸汽侧高温氧化的性能。

20世纪80年代以来各国在开发这类高热强钢方面已取得了显著的成绩，日本已开发出一系列性能优良且经过长期运行考验的新钢种，如用于高温过热器和再热器管的Super304H（18Cr10Ni3Cu，日本牌号为Sus304JIHB）、HR3C（25Cr20NiNb，日本牌号为Sus310JIYB）和TP347HFG等。这些钢种都具有高的热强性（即高温蠕变强度），而且具有良好的抗烟侧高温腐蚀和抗蒸汽氧化的性能，其中尤以含Cr、Ni最多的HR3C在热强性、抗高温腐蚀和蒸汽氧化方面最为突出，已成功应用于汽温为600℃/600℃的百万千瓦级超超临界锅炉中。TP347HFG和Super304HFG则可用于蒸汽温度为566~580℃的超临界



和超超临界锅炉中。在超超临界锅炉的集箱和导管的新钢种方面，在 P91 的基础上开发了 P92 (或称 NF616)，即在 P91 的 Cr、Mo 成分基础上加入 1.5%~2% 的钨，已成功地应用于 600℃ 等级锅炉的过热器和再热器出口集箱和主汽导管上，另外在超超临界锅炉水冷壁的管材方面，又开发了 HCM2A (T23，即在 T22 的基础上加 1.5% 的钨) 和 HCM12 (T122)。前者可用于汽温为 600℃ 的超超临界锅炉，后者可用于汽温达 650℃ 的超超临界锅炉或者用于普通超临界锅炉的末级过热器。此外，三菱和住友钢铁公司联合开发了 ASME Code Case 2328 的 18% Cr 细晶粒奥氏体钢，即在原 TP347H 的基础上加钨、氮等成分，它的高温强度比普通的 TP347H 高 15%，且具有良好的抗蒸汽氧化层剥落的性能，它适用于过热器分隔屏管，已在日本三隅等 1000MW USC 锅炉中取得良好的运行业绩。

欧洲国家为了配合火力发电厂 700℃/700℃ 的规划，近年来也开发了一些可用于超超临界机组的高热强钢，如 Vollaurec & Mannesmann 钢管公司开发了用于水冷壁的 7CrMoVTiB1010 (T24，即在 10CrMo910 的基础上加入 Ti、N、Nb 及 B 等成分)，在奥氏体方面，德国开发了 X3CrNiMoN1713，但尚未应用于锅炉，欧洲 (德国、丹麦) 的超超临界锅炉高温过热器、再热器的管材基本采用日本开发的已有长期运行业绩的钢种，如 TP347HFG、P91 和 P92 等。上述钢材的化学成分见表 1-4 和表 1-5。

表 1-4 集箱和导管用钢材化学成分

%

牌 号	C	Cr	Mo	W	Co	其它
X20CrMoV121	0.17~0.23	10.0~12.5	0.80~1.20			V
P91	0.08~0.12	8.0~9.5	0.85~1.05			V,Nb,N
NF616(P92)	0.07~0.13	8.5~9.5	0.30~0.60	1.5~2.0		V,Nb,N,B
E911	0.09~0.13	8.5~9.5	0.90~1.10	0.9~1.1		V,Nb,N,B
HCM12A(P122)	0.07~0.14	10.0~12.5	0.25~0.60	1.5~2.5		V,Nb,N,B,Cu
NF12	0.08~0.11	10.6~11.1	0.10~0.20	2.5~2.7	2.4~2.8	V,Nb,N,B
SAVE12	0.08	10.0	0.15	3.0	2.5	V,Nb,N,B,Cu

表 1-5 过热器和再热器管用钢材化学成分

%

牌 号	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	其它
马氏体钢:						
X20CrMoV121	10.0~12.5	0.30~0.80	0.80~1.20	—	—	V
P91	8.0~9.5	max 0.40	0.85~1.05	0.06~0.10	—	V,N
HCM12	11.0~13.0	—	0.80~1.20	max 0.20	—	V
奥氏体钢:						
X3CrNiMoN1713	16.0~18.0	12.0~14.0	2.0~2.8	—	—	N
Super304H	17.0~19.0	7.5~10.5	—	0.30~0.60	—	Cu,N
Tempaloy A-1	17.5~19.5	9.0~12.0	—	max 0.40	max 0.20	—
TP347HFG	17.0~20.0	9.0~13.0	—	max 1.0	—	—
NF709	18.0~22.0	22.0~28.0	—	0.10~0.40	max 0.20	N,B
Tempaloy A-3	21.0~23.0	14.5~16.5	—	0.50~0.80	—	N,B
SAVE25	21.0~24.0	15.0~22.0	—	0.30~0.60	—	W,Cu,N
HR3C	24.0~26.0	17.0~23.0	—	0.20~0.60	—	N

### 第三节 超超临界锅炉工作原理及基本形式

#### 一、直流锅炉的工作原理

根据锅炉蒸发系统中汽水混合物流动工作原理进行分类，锅炉可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉三种。若蒸发受热面内工质的流动是依靠下降管中水与上升管中汽水混合物之间的密度差所形成的压力差来推动的，此种锅炉为自然循环锅炉；若蒸发受热面内工质的流动是依靠炉水循环泵压头和汽水密度差来推动，此种锅炉为强制循环锅炉；若工质一次性通过各受热面，此种锅炉为直流锅炉。

直流锅炉是由许多管子并联，然后再用联箱连接串联而成。它适用于任何压力，通常用于工质压力 $\geq 16\text{MPa}$ 的情况，且是超临界参数锅炉唯一可采用的炉型。

(1) 直流锅炉的工作原理 直流锅炉依靠给水泵的压头将锅炉给水一次通过预热、蒸发、过热各受热面而变成过热蒸汽。直流锅炉的工作原理如图 1-1 所示。



图 1-1 直流锅炉的工作原理示意图

在直流锅炉蒸发受热面中，由于工质的流动不是依靠汽水密度差来推动的，而是通过给水泵压头来实现的，工质一次通过各受热面，蒸发量  $D$  等于给水量  $G$ ，故可认为直流锅炉的循环倍率  $K=G/D=1$ 。

直流锅炉没有汽包，在水的加热受热面和蒸发受热面间，及蒸发受热面和过热受热面间无固定的分界点，在工况变化时，各受热面长度会发生变化。

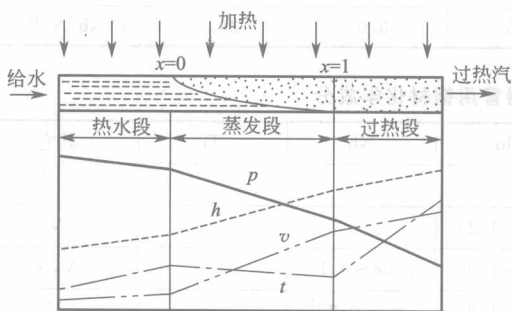


图 1-2 直流锅炉管子工质的状态和参数的变化

沿直流锅炉管子工质的状态和参数的变化情况示于图 1-2。由于要克服流动阻力，工质的压力沿受热面长度不断降低；工质的焓值沿受热面长度不断增加；工质温度在预热段不断上升，而在蒸发段由于压力不断下降，工质温度不断降低，在过热段工质温度不断上升；工质的比容沿受热面长度不断上升。

#### (2) 直流锅炉的特点

① 结构特点 直流锅炉无汽包，工质一次通过各受热面，且各受热面之间无固定界限。直流锅炉的结构特点主要表现在蒸发受

热面和汽水系统上。直流锅炉的省煤器、过热器、再热器、空气预热器及燃烧器等与自然循环锅炉相似。

② 适用于压力等级较高的锅炉 根据直流锅炉的工作原理，任何压力的锅炉在理论上都可采用直流锅炉。但实际上没有中、低压锅炉采用直流型，高压锅炉采用直流型的较少，超高压、亚临界压力等级的锅炉可较广泛地采用直流型，而超临界压力的锅炉只能采用直流型。

中低压锅炉容量较小，仪表较简单，自动化控制水平较低，对给水品质的要求不高，自