



超临界、超超临界 燃煤发电技术

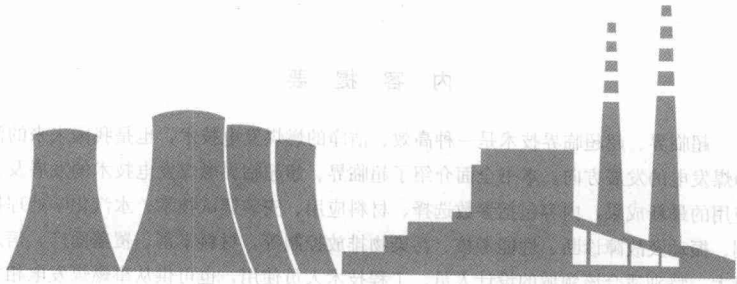
CHAOLINJIE CHAOCHAOLINJIE
RANMEI FADIAN JISHU

西安热工研究院 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



超临界、超超临界 燃煤发电技术

西安热工研究院 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

超临界、超超临界技术是一种高效、洁净的燃煤发电技术，也是我国未来的洁净煤发电的发展方向。本书全面介绍了超临界、超超临界燃煤发电技术的发展及其应用的最新成果，内容包括参数选择、材料应用、安装调试技术、水汽化学处理控制、振动及故障诊断、性能考核、污染物排放控制等，材料丰富、覆盖面广、信息量大。特别适合该领域的设计人员、工程技术人员使用，也可供从事燃煤发电相关工作的技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

超临界、超超临界燃煤发电技术/西安热工研究院编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-8026-1

I. 超… II. 西… III. 超临界-火电厂-燃煤锅炉 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 157572 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

*

2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 512 千字

印数 0001—3000 册 定价 48.00 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

《超临界、超超临界燃煤发电技术》

编委会

主任委员	蒋敏华			
副主任委员	赵毅	朱宝田		
委员	蒋敏华	赵毅	朱宝田	朱立彤
	吴生来	李续军	刁志勇	胡洪华
	李耀君	王喆	周荣灿	雷兆团
	张学延	李志刚	孙献斌	张亚夫
	王酉生	柴华强	刘英雄	
主编	蒋敏华			
副主编	赵毅	朱宝田		
编委	蒋敏华	赵毅	朱宝田	朱立彤
	吴生来	李续军	刁志勇	胡洪华
	李耀君	王喆	周荣灿	雷兆团
	张学延	李志刚	孙献斌	张亚夫
	王酉生	柴华强	刘英雄	

前言

我国的能源结构决定了发电以煤为主的格局在比较长的时间内不会改变。提高发电机组效率和资源利用率、改善环境质量,是发电行业技术进步的永恒主题。按照电力发展规划,到2020年,我国发电装机容量将达到12亿kW,迫切需要新一代燃煤发电设备来装备电力工业。

超临界、超超临界燃煤发电技术是成熟、先进的技术,超临界、超超临界机组已大容量和规模化商业运行,其效率比亚临界机组有大幅度的提高,在可靠性、可用率、运行性能等方面和亚临界机组相当。加装烟气脱硫、脱硝和除尘装置后,可以实现较低的污染物排放,满足严格的排放标准。超临界、超超临界燃煤发电技术是国际上、也是中国燃煤火电机组发展的主导方向,是未来30年洁净煤发电的主流技术。

20世纪90年代,我国引进了一批超临界机组;“十五”期间,“863”项目“超超临界燃煤发电技术”的研发及其依托工程华能玉环电厂超超临界1000MW机组的建设,使我国发电技术的总体水平有了一个跨越性的发展。截至2007年,我国已有50多台超临界、超超临界机组投运,其中已投运的7台超超临界1000MW机组各项技术性能指标居国际先进水平。通过超临界、超超临界机组的建设,我国已初步掌握了超临界、超超临界发电技术。

为适应我国电力工业对超临界、超超临界燃煤发电技术的需求,西安热工研究院组织编写了本书。

本书展示了超临界、超超临界燃煤发电技术应用和发展的最新成果,也包含了西安热工研究院在超临界、超超临界燃煤发电技术领域的研究成果和宝贵的实践经验。本书比较全面、系统地介绍了超临界、超超临界机组在设计、研发、制造、安装、运行中的关键技术。内容包括参数选择、材料应用、结构特点、安装、调试、运行控制、水汽品质控制、振动及故障诊断、厂级信息系统、性能考核、排放控制等。内容新颖,材料丰富,覆盖面广,信息量大。本书由蒋敏华任主编,赵毅、朱宝田任副主编,第一、二、五、六章由朱宝田编写;第三章由雷兆团编写;第四章由孙献斌编写;第七章由周荣灿编写;第八章由李志刚编写;第九章由习志勇编写;第十章由王喆编写;第十一章由张亚夫编写;第十二章由李续军编写;第十三章由张学延编写;第十四章由朱立彤编写;第十五章由吴生来编写;第十六章由李耀军编写;第十七章由胡洪华编写。王西生承担了组织协调工作,柴华强承担了组稿及后期加工工作,刘英雄对稿件进行了初审。除了所列的参考文献外,作者还参阅和直接引用了西安热工研究院在超临界、超超临界燃煤发电技术领域的研究成果和工程实践经验。在编写过程中,得到了有关专家的指导,西安热工研究院各相关专业技术部门以及科研管理部都给予了大力支持,在此一并致谢。

本书的出版，可使国内电力行业的管理和专业技术人员，特别是关注燃煤发电技术的读者了解目前最先进的超临界、超超临界燃煤发电技术，具有重要的参考价值和工程应用价值。对于具体的工程项目，读者应根据相应工程的特点，灵活应用本书的知识。

由于作者水平限制及编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，欢迎读者不吝赐教。

前言

本书编委会

2008年5月14日

目 录

前 言	
第一章 超临界、超超临界燃煤发电技术的发展和现状	1
第一节 概述	1
第二节 超临界与超超临界参数	1
第三节 国外的发展和现状	2
第四节 国内的发展和现状	10
第二章 超临界、超超临界机组主要参数选择与技术选型	15
第一节 再热次数及主要蒸汽参数	15
第二节 机组容量	17
第三节 主要结构型式	18
第四节 技术经济分析	20
第五节 推荐的主要蒸汽参数与结构选型	21
第三章 超临界、超超临界锅炉的结构特点和关键技术	23
第一节 我国超临界、超超临界锅炉的发展及现状	23
第二节 锅炉炉型	24
第三节 燃烧方式	25
第四节 水冷壁	29
第五节 锅炉启动系统	31
第六节 国产 1000MW 超超临界锅炉的总体型式	34
第四章 超临界循环流化床锅炉	35
第一节 循环流化床锅炉燃烧技术	35
第二节 超临界 CFB 锅炉研究与设计	38
第五章 超临界、超超临界汽轮机的结构特点和关键技术	43
第一节 东汽—日立型 1000MW 汽轮机	43
第二节 哈汽—东芝型 1000MW 汽轮机	52
第三节 上汽—西门子型 1000MW 汽轮机	59
第四节 三种 1000MW 超超临界参数汽轮机技术特点分析	68
第六章 超临界、超超临界空冷汽轮机	79
第一节 概述	79
第二节 空冷汽轮机的特点	80
第三节 超临界空冷汽轮机	81
第四节 超超临界空冷汽轮机	84
第五节 超超临界空冷机组的经济性	84

第七章 超临界、超超临界机组材料的选用与焊接	86
第一节 概述	86
第二节 国外耐热钢发展计划	86
第三节 耐热钢的发展及趋势	87
第四节 机组部件材料选择与应用	94
第五节 700℃级别机组材料研究进展	99
第六节 国内的材料研究、使用现状与建议	101
第七节 焊接技术	101
第八章 超临界、超超临界机组的水汽品质控制	113
第一节 超超临界机组水汽特点	113
第二节 超超临界机组水汽品质控制	121
第三节 小结	127
第九章 超临界、超超临界机组的自动控制技术	129
第一节 概述	129
第二节 自动控制系统的主要难点	130
第三节 自动控制系统的主要特点	132
第四节 华能玉环电厂 1000MW 超超临界机组自动控制	139
第十章 超临界、超超临界机组仿真技术	154
第一节 应用意义	154
第二节 发展过程和趋势	154
第三节 支撑软件 APROS 的功能及特点	159
第四节 仿真装置的组成及配置	162
第五节 仿真培训装置	166
第六节 通用虚拟 DCS 的设计与实现	168
第十一章 超临界、超超临界机组启动调试	177
第一节 汽轮机的启动	177
第二节 机组甩负荷试验	179
第三节 蒸汽管道吹洗	180
第四节 水冷壁超温	183
第五节 燃烧调整	183
第六节 冷热态冲洗	184
第七节 干湿态转换	185
第八节 热工系统	185
第九节 清洗系统	185
第十二章 超临界、超超临界机组运行特性	188
第一节 电网对大容量机组运行特性的要求	188
第二节 日本超临界机组的运行特性	189
第三节 国产化 600MW 超临界机组运行特性	197
第四节 日本超超临界机组运行特性	199
第五节 国产化超超临界机组运行特性	207

第六节	小结	215
第十三章	超临界、超超临界汽轮发电机组的振动	218
第一节	概述	218
第二节	汽轮机蒸汽激振的机理与振动特征	218
第三节	国外超临界机组汽轮机蒸汽激振问题和治理	220
第四节	国内超临界、超超临界和大型亚临界机组的振动	223
第五节	超临界、超超临界机组汽轮机蒸汽激振故障的对策	226
第六节	小结	228
第十四章	超临界、超超临界汽轮机性能考核	230
第一节	汽轮机热力性能试验概述	230
第二节	汽轮机性能试验规程(ASME PTC6)	234
第三节	汽轮机性能试验测点安装说明	243
第四节	流量测量	246
第五节	汽轮机运行优化试验	253
第十五章	超临界、超超临界锅炉性能考核试验及燃烧调整	260
第一节	电站锅炉性能考核试验项目	260
第二节	试验标准	261
第三节	试验实施的技术路线	262
第四节	测点布置及安装	265
第五节	测量项目及测试方法	268
第六节	试验实施	271
第七节	试验结果的计算	273
第八节	四角切圆燃烧方式调整方案设计	275
第九节	前后墙对冲燃烧方式调整方案设计	282
第十节	燃烧调整试验结果整理	284
第十一节	配煤掺烧	285
第十六章	超临界、超超临界机组设备维修管理优化技术	288
第一节	寿命管理	288
第二节	设备状态与寿命评估基本方法	290
第三节	寿命管理实施	292
第四节	风险管理技术	298
第五节	高重要度设备检修计划的修订	302
第六节	以可靠性为中心的维修分析技术	304
第十七章	火电厂厂级监控信息系统	310
第一节	概述	310
第二节	SIS 系统数据库	312
第三节	SIS 系统应用	317
第四节	SIS 应用功能及计算方法	323
第五节	SIS 的发展	325

度。各国、甚至各公司对超超临界参数的开始点定义均有所不同。例如，日本的超超临界参数定义为压力大于 24.2MPa，或温度达到 593℃；丹麦的定义为压力大于 27.5MPa；西门子的观点是应从材料的等级来区分超临界和超超临界机组等。我国电力百科全书则将超超临界定义为蒸汽压力参数高于 27MPa。

综合以上观点，“十五”期间“863”计划项目“超超临界燃煤发电技术”将超超临界机组的研究范围设定在蒸汽压力大于 25MPa、或蒸汽温度高于 593℃的范围。

第三节 国外的发展和现状

在蒸汽动力装置的发展过程中，超临界机组和超超临界机组是同时研发和交叉发展的。1957年，美国投运的第一台 125MW 高参数机组就是超超临界机组，其蒸汽参数为 31MPa、621/566/538℃。经过近半个世纪的研究、完善和发展，目前超临界和超超临界机组已经进入了成熟和商业化运行的阶段。

据统计，目前全世界已投入运行的超临界及以上参数的发电机组大约有 600 多台，其中美国有 170 多台，日本和欧洲各约 60 台，俄罗斯及原东欧国家 280 余台；世界范围内属于超超临界参数的机组大约有 70 台。近年来在欧洲和日本投运的主要超超临界机组见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 近期在欧洲投运的超超临界机组

电 厂	国 家	燃 料	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/℃/℃/℃)	投运时间
Skaerbaek 3 号	丹麦	气	411	29/582/580/580	1997
Nordjyllands 3 号	丹麦	煤	411	29/582/580/580	1998
Avedore	丹麦	气/煤	410	30/580/600	2000
SchoPau A, B	—	褐煤	450	28.5/545/560	1995-06
Schwarze Pumpe A, B	德国	褐煤	874	25.3/544/560	1997-08
Boxberg Q, R	德国	褐煤	910	25.8/541/580	1999-2000
Lippendorf R, S	德国	褐煤	930	26.0/550/580	1999-2000
Bexbach 2 号	德国	煤	750	25/575/595	1999
Niederausem K	德国	褐煤	1025	26.5/576/599	2002

表 1-2 日本 1990 年以来投运的主要超临界和超超临界机组

电 厂	所属电力公司	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/℃/℃/℃)	投运时间
川越 KAWAGOE 1 号	Chubu	700	31/566/566/566	1989-06
川越 KAWAGOE 2 号	Chubu	700	31/566/566/566	1990-06
碧南 Hekinann 3 号	Chubu	700	24.6/538/593	1993-04
能代 Noshiro 2 号	Tohoku	600	24.6/566/593	1994-12
七尾太田 Nanao-Ohta 1 号	Hokuriku	500	24.6/566/593	1995-03
Reihoku 1 号	Kyushu	700	24.1/566/566	1995-07

续表

电 厂	所属电力公司	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/°C/°C/°C)	投运时间
原汀 Haramachi 1 号	Tohoku	1000	25/566/593	1997-07
松浦 Matsuura 2 号	EPDC	1000	24.6/593/593	1997-07
三隅 Misumi 1 号	Chugoku	1000	25/600/600	1998-06
原汀 Haramachi 2 号	Tohoku	1000	25/600/600	1998-07
七尾太田 Nanao-Ohta 2 号	Hokuriku	700	24.6/593/593	1998-07
碧南 Hekinann 4 号	Chubu	1000	24.6/566/593	2001-11
碧南 Hekinann 5 号	Chubu	1000	24.6/566/593	2002-11
敦贺 Tsuruga 2 号	Hokuriku	700	24.6/593/593	2000-10
橘湾 Tachibana-wan	Shikoku	700	24.6/566/566	2000-07
Karita 1 号 (PFBC)	Kyushu	350	24.6/566/593	2000-07
苓北 Reihoku 2 号	Kyushu	700	24.6/593/593	2003-07
橘湾 Tachibana-wan 1 号	EPDC	1050	25/600/610	2000-07
橘湾 Tachibana-wan 2 号	EPDC	1050	25/600/610	2001-07
Isogo (新 1 号)	EPDC	600	25.5/600/610	2002-04
常陆那珂 Hitachinaka 1 号	Tokyo	1000	24.5/600/600	2002
舞鹤 Maizumi 1 号	Kansai	900	24.1/593/593	2003
舞鹤 Maizumi 2 号	Kansai	900	24.1/593/593	2003

一、发展过程和阶段

超临界和超超临界发电技术的发展过程大致可以分成三个阶段。

第一阶段，从 20 世纪 50 年代开始，以美国和德国等为代表，当时的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 310MW 的超超临界机组，进汽压力为 34.5MPa，进汽温度达到 649°C。由于机组可靠性的问题，在经历了初期超超临界参数后，从 20 世纪 60 年代后期开始至 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°C；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，是超临界机组优化及新技术发展的阶段。该阶段仍以美国 GE、西屋公司为中心。从 20 世纪 70 年代起，美国 GE 及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入，克服了早期超临界机组所遇到的可靠性问题。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 年代开始进入了新一轮的发展阶段。这也是世界上超超临界机组快速发展的阶段，即在保证机组高可靠性、高可用率的前提下采用更高的蒸汽温度

和压力。其主要原因在于国际上环保要求日益严格，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，温度按 50°F 一档划分，相当于 538°C (1000°F)、566°C (1050°F)、593°C (1100°F)。按材料的高温性能，产品实际应用的温度又有 600/610°C（其材料与 593°C 相同）一档。高温参数主要影响材料的选用，还影响锅炉过热器和再热器设计，汽轮机进汽段部件如阀门、进气管、蒸汽室、叶片和转子的设计。高温、高强度材料的成功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。近期欧洲及日本生产的新机组，大多数机组的压力保持在 25MPa 左右，进汽温度均提高到了 580~600°C。

(2) 蒸汽压力和温度同时都取较高值（28~30MPa，600°C 左右），从而获得更高的效率。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。压力的提高不仅关系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，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源于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、阿尔斯通等在大功率机组中已开始使用末级钛合金长叶片。

二、各国发展情况

1. 美国

美国是世界上发展超临界火电机组最早的国家，早在 20 世纪 50 年代初就开始了超临界发电技术的探索和研究。目前美国超临界机组在数量上居世界第二位，并拥有 9 台世界上最大的超临界机组，单机容量为 1300MW，详见表 1-3。

表 1-3 美国现役单机容量为 1300MW 的火电机组

电 站	锅炉 制造商	锅炉蒸发量 (t/h)	汽轮机 制造商	运行 方式	主蒸汽压力 (MPa)	主/再热蒸汽温度 (°C)	投运时间
Cumberland 1、2 号	B&W	4535	ABB	定压	24.2	538/538	1972/1973
Amos 3 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1973-10
Gavin 1、2 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1974/1975
Mountaineer 1 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1980-09
R'CKport 1、2 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1984/1989
Zimmer	B&W	4433		定压	25.4	538/538	1991-03

美国俄亥俄州 Philo 电厂 6 号机于 1957 年投产，这是世界上第一台超临界机组。容量为 125MW，蒸汽压力为 31MPa，蒸汽温度为 621/566/566°C，二次中间再热。1959 年，Eddystone 电厂 1 号机投产，这是一台容量为 325MW，蒸汽压力为 34.3MPa，蒸汽温度为 649/565/565°C 的二次中间再热机组，热耗为 8630kJ/(kW·h)。该机组在设计参数下运行了 8 年后，因锅炉过热器高温腐蚀和汽轮机高压缸蠕变变形等材料问题，自 1968 年起改为

降低主蒸汽参数运行。

由于超临界机组的效率比亚临界有明显提高,从20世纪60年代中期起,超临界机组在美国得到了快速发展,新建机组容量中有一半以上是超临界机组,最大单机容量达到了1300MW。但是,早期的超临界机组事故偏多,可用率低及维修费用高。美国煤价较低,热效率提高对机组运行经济性改善效果不显著,加之当时超临界机组调峰能力较差,不能适应市场需要,所以20世纪80年代以后超临界机组订货减少。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的亚临界机组高3%左右,经过初期的运行后,机组可用率和可靠性达到与汽包炉机组相当的水平。虽然超临界机组的发展有过一段时间的停顿,在20世纪八九十年代,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。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,有些机组的低负荷运行极限由50%下降到了25%,电厂对超临界机组的运行越来越适应了。为了提高机组可用率,美国以后发展的超临界机组的蒸汽参数多采用24.1MPa,主蒸汽温度538℃,一次再热蒸汽温度为538℃,二次再热时用552/565℃,这种蒸汽参数一直保持了20余年。

EPRI还对超超临界机组蒸汽参数和容量等进行了优化研究,认为超超临界机组采用蒸汽压力31MPa,温度566~593℃,二次中间再热,容量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。但是由于美国更倾向于发展高效的燃气—蒸汽联合循环,超超临界技术发展计划没有得到实施。

美国采用二次中间再热的机组比较多,表1-4列举了一些采用二次中间再热的超临界机组。

表1-4

美国采用二次中间再热的超临界机组

机 组	所属电力公司	蒸汽参数 (MPa/℃/℃/℃)	容 量 (MW)
Eddystone 1号	PECO	34.3/649/565/565	325
Breed 1号	AEP	24/565/565/565	450
Sporn 5号	AEP	24/565/565/565	450
Eddystone 2号	PECO	24/565/565/565	325
Tanners Creek 4号	AEP	24/538/552/565	580
Muskingum River 5号	AEP	24/538/552/565	590
Cardinal 1、2号	AEP	24/538/552/565	600
Hudson 1号	PSEG	24/538/552/565	400
Brayton Point 1号	NEP	24/538/552/565	600
Hudson 2号	PSEG	24/538/552/565	600
Big Sandy 2号	AEP	24/538/552/565	760
Chalk Point 1、2号	PEPCO	24/538/552/565	355
Haynes 5、6号	LADWP	24/538/552/565	330
Mitchell 1、2号	AEP	24/538/552/565	760
Amos 1、2号		24/538/552/565	760

近期, GE 公司为日本制造了一台蒸汽温度 593°C 的 1000MW 等级机组和一台蒸汽参数为 26.6MPa 、 $577/600^{\circ}\text{C}$ 的 750MW 的机组, 还设计了蒸汽参数为 25MPa 、 $600/610^{\circ}\text{C}$ 的机组。美国目前正在进行新一代 (760°C) 的用于超超临界参数机组的锅炉材料研究计划, 以开发温度和压力更高的机组。

2. 俄罗斯 (包括苏联)

俄罗斯 (包括苏联) 在热力发电技术的研究开发上独立于其他国家, 走了一条自己的发展道路, 其超临界机组的研制也主要立足于国内, 有自己的特点。

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。第一台超临界 300MW 机组于 1963 年投入运行, 参数为 $23.5\text{MPa}/580^{\circ}\text{C}/565^{\circ}\text{C}$ 。后经改进和完善, 并将蒸汽温度降到 $540/540^{\circ}\text{C}$, 使机组的可靠性得到提高, 逐步形成了 300MW、500MW、800MW、1200MW 4 个容量等级。俄罗斯生产的超临界机组的蒸汽参数大多为常规超临界参数, 蒸汽压力一般为 24MPa , 蒸汽温度一般在 $545\sim 565^{\circ}\text{C}$ 的范围内。第一台超临界 500MW、800MW 机组于 1968 年投入运行。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 $23.5\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}/540^{\circ}\text{C}$, 已经运行二十多年, 仍是当前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。苏联 300MW 及以上容量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, 是超临界机组数目最多的国家, 全国大约 40% 的电力由超临界机组提供。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。俄罗斯还生产了近 20 台 300、500 和 800MW 的机组供应给中国和古巴。

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; 直接接触式给水加热器, 以降低热耗; Baumann 式的低压通流部分设计; 带加热装置的高中压缸法兰, 缩短启动时间; 两侧布置的凝汽器, 降低蒸汽流速, 改善真空; 超临界机组热电联产, 提高能源利用率等。

据介绍, 目前俄罗斯的列宁格勒金属工厂和莫斯科动力学院设计了新一代的高参数超临界机组, 蒸汽参数为 $(30\sim 32)\text{MPa}/(580\sim 600)^{\circ}\text{C}/(580\sim 600)^{\circ}\text{C}$, 给水温度为 300°C , 当凝汽器压力为 $3.4\sim 3.6\text{kPa}$ 时, 预计电站效率可以达到 $44\%\sim 46\%$ 。

3. 日本

日本资源缺乏, 注重发电机组的效率。日本从 20 世纪 60 年代中期开始发展超临界压力机组。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火电机组在运行。日本发展超临界机组主要采取引进、仿制、创新的技术路线。第一台超临界机组是日立公司从美国 B&W 公司引进的, 机组容量为 660MW, 参数为 $24.12\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$, 于 1967 年在姊崎电厂投运。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, 很快由仿制过渡到应用自己的科研成果。两年后, 仿制的同型机组就投入运行, 1971 年投运的 600MW 超临界机组则已经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蒸汽参数一般都限制在 $24.6\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ 。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，主蒸汽温度和再热蒸汽温度为 566/566/566℃，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、593/593℃的超超临界 700MW 机组已于 1998 年在七尾大田电站投运。25MPa、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 年在橘湾电厂投运的 2 台容量为 1050MW、蒸汽参数为 25.5MPa/600℃/610℃的超超临界机组。主要的超超临界机组大部分是大容量机组，见表 1-2。

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停的要求。日本各公司从欧洲引进了适合变压运行的螺旋管圈锅炉技术，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速率。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。目前，日本的超超临界机组以可靠性高、经济性好、技术发展快而跃居为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。下一步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℃。

4. 欧洲区域

欧洲超临界机组大部分在德国、意大利、荷兰和丹麦，见表 1-1。

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。1956 年投运了一台蒸汽参数为 34MPa/610℃/570℃/570℃、容量为 88MW 的超超临界机组。1972 年投运了一台 430MW 超临界机组（参数为 24.5MPa/535℃/535℃），1979 年投运了一台二次再热的 475MW 超临界机组（参数为 25.5MPa/530℃/540℃/530℃）。

德国开发了螺圈管式水冷壁锅炉，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采用。德国近年来很重视发展超临界机组，德国已投运和在建的超临界机组近 20 台，其中具有代表性的超临界机组是：1992 年 8 月在 Staudinger 电厂投运的 500MW 机组（参数为 25MPa/540℃/560℃）；1999 年在 Lippendorf 电厂投运的容量为 930MW，蒸汽参数为 26.0MPa/550℃/580℃的超超临界机组；2000 年在 Niederausem 电厂投运的容量为 1025MW，蒸汽参数为 26.5MPa/576℃/599℃的超超临界机组；在 Hessler 电厂投运了容量为 700MW，蒸汽参数为 30MPa/580℃/600℃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 25MPa/580℃/600℃的汽轮机。在 20 世纪末设计的超超临界机组，容量在 400~1000MW 范围内，蒸汽参数为 27.5MPa/589℃/600℃，机组净效率在 45% 以上。

丹麦 FLSmiljø 公司研究开发的前 2 台超超临界机组，容量为 411MW，过热蒸汽出口压力为 29MPa，二次中间再热、过热蒸汽和再热汽温为 582/580/580℃，机组效率为 47%，净效率达 45%（采用海水冷却，汽轮机的背压为 2.6kPa）。后来又开发了参数为 30.5MPa/582℃/600℃、容量为 410MW 的超超临界机组，该机组采用一次中间再热，机组设计效率为 49%，从而成为迄今热效率最高的火电机组。

三、对国外超超临界机组发展的分析

分析国外超超临界机组发展的历程和现状,可以得到以下结论。

(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,运行控制难度趋于提高,机组可用率低。因此,早期美国只生产了3台超超临界机组之后便停止生产。到20世纪80年代,又退回到超临界参数。

(2) 中期(20世纪80年代末)以日本川越电厂31MPa/566℃/566℃/566℃超超临界机组为代表,走的是一条从引进到自主开发,有步骤、有计划的发展之路。

(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,取得了显著的成功。

(4) 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℃。

(5) 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℃,目前又倾向于采用一次再热。

(6) 采用二次再热的超超临界机组,除了早期美国的三台机组外,只有日本川越(1989年)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趋向于采用一次再热。

(7) 20世纪90年代中期以来,世界上已建和在建的超超临界机组的参数和容量的发展有两个特点:一是欧洲的国家在建设大容量火力发电机组时,以追求机组的高效率为主要目标,在提高蒸汽温度的同时,蒸汽压力也随之提高,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。二是日本的超超临界机组,在大幅度提高机组容量的时候,主要是提高机组的蒸汽温度,而蒸汽压力基本保持在25MPa;这种对超超临界机组蒸汽参数(较低的蒸汽压力和较高的蒸汽温度)的选择主要是基于技术经济方面的考虑。

(8) 锅炉布置按各公司传统,有II型布置及塔式布置。日本超超临界锅炉全部采用II型布置,德国、丹麦全部采用塔式布置,主要是各自的传统技术所决定的。

(9) 锅炉燃烧方式按各公司传统,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。欧洲的超超临界塔式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,还有个别的双切圆燃烧和八角单切圆燃烧。

(10) 水冷壁型式为垂直管屏和螺旋管圈二种类型共存。美国早期为垂直管屏,欧洲为螺旋管圈。20世纪90年代后,除日本三菱公司新开发了内螺纹垂直管屏外,其余全部采用螺旋管圈。

(11) 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长叶片的开发应用,大容量单轴机组已成为发展的趋势。

四、研发计划

为了发展高效率的超超临界机组,一些政府组织、国家和制造厂商已经公布了下一代高效超临界机组的发展计划。主汽温度将提高到700℃,再热汽温达720℃,相应的主蒸汽压力将从目前的30MPa左右提高到35~40MPa。根据英国贸工部对超临界蒸汽发电的预测,到2010年,超临界机组蒸汽温度将达到620℃。到2020年,蒸汽温度将达到650~700℃,循环效率可达到50%~55%。

美国、日本和欧洲一些国家投入了大量财力和人力,展开了各自的新材料研发计划。这些材料分别针对不同参数级别的机组,如 593℃(包括欧洲的 580℃机组和日本的 600℃机组)级别、620℃级别、650℃级别和正在研发之中的更高温度级别的机组。新开发的耐热材料在投入正式使用之前进行了大量的实验室和实机验证试验。从材料的实机验证结果来看,国际上目前成熟的材料已经可以用于建造 620℃的机组,而日本最新的报道称已经可以提供 650℃机组所需的关键部件材料。

1. 日本

日本电力(J-Power,原为 EPDC)在日本通商产业省支持下,从政府得到 50%的补助金,与其他单位共同组织超超临界技术的开发。第一阶段目标是:用铁素体钢达到 593℃,进而用奥氏体钢达到 649℃。第二阶段目标是:用新型铁素体钢达到 630℃。日本三大设备制造公司对转子、汽缸、法兰、螺栓等主要部件进行了相应参数下的实物中间试验,50MW 功率的中间试验机组已经投运。

2. 欧洲区域

从 1983 年开始,欧洲实施了 COST 501 计划和 COST 522 计划,其目标分别是建立 29.4MPa/600℃/600℃、29.4MPa/600℃/620℃的机组和开发应用铁素体钢的蒸汽参数为 29.4MPa/620℃/650℃的超超临界机组。

欧盟近年来正在进行的“Thermie 700 计划”,是论证和准备发展具有先进蒸汽参数的未来的燃煤电厂型式,其中关键部件将采用镍基高温合金。Thermie 700 计划的目标是使下一代超超临界机组的蒸汽参数达到 37.5MPa/700℃/700℃,从而效率可达 52%~55%(对海水冷却方式可达 55%,对内陆地区和冷却塔方式可达 52%),使 CO₂ 的排放降低 15%,并降低燃煤电厂的投资。该计划预期在 2014 年完成,能否实现上述目标取决于技术方面的发展。

Thermie 700 计划的重点内容为:

- (1) Ni 基合金材料的研究,700℃时蠕变强度大于 100MPa。
- (2) 700~750℃的条件下进行新材料试验,包括强度、蠕变特性、脆性、抗氧化性能等。
- (3) 锅炉和汽轮机的设计、循环优化。
- (4) 经济分析和评价。
- (5) 进行 400MW 和 1000MW 两种机型的设计,参数为 700/720/720℃。

Thermie 700 计划分阶段进行:

(1) 第一阶段:概念设计,材料选择和试验。

包括材料开发工作、设备和部件设计研究工作。包括镍基超级合金在锅炉的使用,代替现有的铁素体合金材料;奥氏体合金材料及在项目中的应用、试验及认证。第一阶段的费用为 2140 万欧元。

(2) 第二阶段:基础设计,材料进一步试验。

第二阶段从 2002 年到 2005 年,主要工作有:①关键部件的设计和试验;②进一步研究如何采用更少的超合金材料;③试验设施的概念设计;④示范电厂的商务计划。

(3) 第三阶段:全尺寸设备试验。

全尺寸设备试验包括合同、设计采购、建设和运行。第三阶段在 2006 年启动,包括示范电厂的建设,估计到 2011 年完成。

(4) 第四阶段:建设示范电厂(2007—2013)。