

超(超)临界机组 启动运行与控制

赵志丹 党黎军 刘 超 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超(超)临界机组 启动运行与控制

赵志丹 党黎军 刘 超 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分十章。第一、第二章介绍了超（超）临界机组的发展概况、超（超）临界机组的主要形式及特点；第三章讲述了超（超）临界机组的启动与运行调整；第四～八章分别介绍了超（超）临界机组的顺序控制、超（超）临界机组的连锁保护、汽轮机安全监视及保护系统、汽轮机旁路控制系统、超（超）临界机组汽轮机数字电液调节系统；第九章讲述了超（超）临界机组的自动控制特点，控制策略和实现方法、逻辑设计要点以及试验结果；第十章讲述了机组自动快速减负荷（RUNBACK）功能的设计与试验。

本书对从事超（超）临界机组电站设计、制造、调试、运行、维修、技术监督、管理和监理的工程技术人员，对大专院校、科研单位从事热能动力、自动控制科研与教学的广大人员，均有参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

超（超）临界机组启动运行与控制/赵志丹等编著. —北京：
中国电力出版社，2011.11

ISBN 978-7-5123-2344-5

I. ①超… II. ①赵… III. ①超临界机组-火力发电-发电机组-
电力系统运行②超临界机组-火力发电-发电机组-自动控制系统
IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 233077 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 3 月第一版 2012 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 462 千字
印数 0001—3000 册 定价 53.00 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

前 言

我国的能源以煤炭为主，在我国的发电能源结构中，燃煤发电仍处于主导地位。随着世界经济的发展和环保要求的日益提高，燃煤发电与环境保护的矛盾日益突出。电力工业作为各国经济的重要组成部分，更面临着提高机组运行效率、降低能源损耗及减少环境污染的问题，这也是当代发电设备技术发展的主要趋势。增大机组容量，提高机组的运行参数等级是实现这一目标的重要手段。因此，超临界、超超临界以及高超超临界发电机组已成为燃煤发电机组的主流和发展方向。目前大型火电机组的平均煤耗为 $350\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 左右，比超临界及超超临界机组高出约 $50\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。如果用超临界机组代替亚临界机组，其节能效果相当可观；机组的煤耗相应减少，也就大大降低了 CO_2 、粉尘和有害气体等污染物的排放，具有显著环保、洁净的特点和优势。同时现代化的先进的大容量超临界及超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($30\% \sim 90\%$ 额定负荷)内变压运行。但随着机组容量及参数等级的提高，机组的运行工艺及自动控制会出现相应的问题，如锅炉爆管、温度波动、煤质多变等。

为了解决超临界及超超临界机组运行及控制方面所面临的问题，我们依托所承担的 350、600、660、1000MW 超临界及超超临界机组电站项目，从机组的启动、运行工艺和过程控制两方面开展研究和试验，并且通过机组投产后的控制优化项目，就机组启动调试及投产后出现的问题，组织锅炉、汽轮机和热控专业的专家和工程师，与设计 and 运行技术人员一起，对控制对象以及控制方式进行深入分析和反复试验，开展了大量研究工作，研究对象涵盖了三大主机厂的主流机组。经过多年试验和实践，在对超临界及超超临界机组启动调试、优化试验数据和控制效果进行分析的基础上，通过吸收国际先进设计和运行管理思想与标准，形成了适用于超临界、超超临界机组的控制方法与技术，从而形成本书，并在多台机组的调试和优化工作中进行了推广应用，取得了良好的效果。希望本书的出版能为超临界、超超临界机组控制技术的发展做出努力。

本书由赵志丹、党黎军、刘超编著。赵志丹、党黎军负责全书的总体组织。第一～

三章由刘超、党黎军编写，第四、五章由高奎、梁朝、赵志丹编写，第六～八章由陈志刚、赵志丹编写，第九、十章由赵志丹编写。郝德锋、谭祥帅参与书中部分逻辑图的绘制和整理工作。党黎军还为本书的编写提供了有益的资料和建议。全书由赵志丹、党黎军统稿。

相关作者具有多台超临界、超超临界机组的调试、试验研究的经验。作者在试验研究和编写过程中得到了多个项目上许多同事的大力支持和帮助；本书编写过程中还借鉴了国内外多位研究者的最新研究成果。在此一并表示感谢！

由于成书仓促，错误与不足之处敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 8 月

目 录

前言

第一章 超(超)临界机组的发展概况	1
第一节 超(超)临界机组发展过程	1
第二节 国外超(超)临界机组发展状况	3
第三节 我国超(超)临界机组发展状况	6
第二章 超(超)临界机组的主要形式及特点	10
第一节 超(超)临界锅炉	10
第二节 超(超)临界汽轮机	18
第三章 超(超)临界机组的启动与运行调整	34
第一节 启动系统分类	34
第二节 机组的典型启动过程与控制要点	37
第三节 运行参数的调整要点	66
第四章 超(超)临界机组的顺序控制	78
第一节 锅炉侧主要辅机的顺序控制	79
第二节 油枪的顺序控制	103
第三节 等离子系统的顺序控制	106
第四节 汽轮机侧主要辅机的顺序控制	108
第五节 机组 APS 控制简介	111
第五章 超(超)临界机组的连锁保护	119
第一节 锅炉侧主要辅机的连锁保护	119
第二节 炉膛安全保护系统	134
第三节 汽轮机侧主要辅机的连锁保护	146
第四节 汽轮机主保护(ETS)	155
第五节 机炉电大连锁保护	165
第六节 汽动引风机的相应连锁保护	168

第六章 汽轮机安全监视及保护系统.....	177
第一节 汽轮机 TSI 系统简介	177
第二节 检测信号的选择.....	179
第三节 TSI 系统调试过程主要内容及要点	182
第七章 汽轮机旁路控制系统.....	187
第一节 汽轮机旁路系统概述.....	187
第二节 汽轮机旁路控制系统.....	189
第三节 调试过程主要内容及要点.....	191
第八章 超(超)临界机组汽轮机数字电液调节系统.....	195
第一节 汽轮机数字电液调节系统的主要功能.....	195
第二节 DEH 包含的几个控制过程	197
第三节 调试过程主要内容及要点.....	202
第九章 超(超)临界机组的自动控制.....	207
第一节 超(超)临界直流锅炉的特点.....	208
第二节 超(超)临界直流锅炉的自动控制.....	211
第三节 超(超)临界直流炉的给水控制.....	222
第四节 分离器入口温度控制.....	230
第五节 过热/再热蒸汽温度的控制	236
第六节 协调控制.....	242
第七节 主燃料控制.....	259
第八节 其他主要子系统的自动控制.....	261
第九节 机组负荷变动试验与 AGC	269
第十节 机组控制优化案例.....	274
第十章 超(超)临界机组自动快速减负荷(RUNBACK)功能的设计与试验	298
第一节 超(超)临界机组 RB 控制策略	298
第二节 RB 试验	301
参考文献.....	309

第一章

超(超)临界机组的发展概况

第一节 超(超)临界机组发展过程

自 20 世纪 50 年代开始,以美国和德国为代表的工业发达国家开始研究、发展超临界和超超临界机组。经过近 30 多年的研究、完善和发展,到 20 世纪 80 年代,超临界、超超临界发电技术逐步趋于成熟,随着运行可靠性、可用率的不断提高,超临界机组逐步成为国际上电力工业发达国家发展燃煤火电机组的主导方向。进入 20 世纪 90 年代后,随着国际社会对环境保护要求的日益严格和新材料的成功开发,发电效率更高、污染物排放量更少的超超临界火力发电技术得到了迅速发展和成功应用,到 20 世纪 90 年代末期,超超临界火力发电技术在国际上已经成为成熟、先进、高效的洁净煤发电的主流技术。

纵观近半个世纪的研究发展历史,超临界和超超临界火力发电技术的发展过程大致可以分为以下三个阶段:

第一阶段:20 世纪 50~70 年代,为以美国 GE、西屋公司和德国为代表的超超临界机组发展的起始阶段。1956 年,德国投运了一台蒸汽参数为 $34\text{MPa}/610^{\circ}\text{C}/570^{\circ}\text{C}/570^{\circ}\text{C}$ 、容量为 88MW 的超超临界机组;1957 年,美国投运了一台蒸汽参数为 $31\text{MPa}/621^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ 、容量为 125MW 的超超临界机组,该机组采用二次中间再热;1959 年,美国 Eddystone 电厂 1 号机组投产,其蒸汽参数为 $34.3\text{MPa}/649^{\circ}\text{C}/565^{\circ}\text{C}/565^{\circ}\text{C}$ 、容量为 325MW。由于早期投产的超超临界机组运行可靠性、可用率较低,自 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蒸汽参数均降低到 $24.1\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ 这一常规超临界参数水平。

第二阶段:从 20 世纪 80 年代开始,是超临界机组优化及新技术发展阶段。该阶段仍以美国 GE 和西屋公司为中心。从 20 世纪 70 年代起,美国 GE 和西屋公司分别将超临界技术转让给日本和欧洲,从 20 世纪 80 年代起,超临界机组的发展市场从美国转移到了欧洲和日本。随着材料制造技术的迅速发展,锅炉、汽轮机材料的性能得到了大幅度的提高,加之对电厂化学用水方面认识的逐步深入,超临界机组运行的可靠性不断得到提高。从 20 世纪 80 年代起,美国 GE 和西屋公司对已经投运的超临界、超超临界机组进行了大规模的优化和改

造, 经过不断的优化、完善和改造, 美国常规超临界机组的可靠性、可用率指标已经达到甚至超过了相应的亚临界机组。通过优化改造实践, 形成了超临界机组新的结构和设计方法, 大大提高了机组运行的经济性、可靠性。与此同时, GE 和西屋、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, 使超超临界发电技术的发展进入了一个新的阶段。

第三阶段: 从 20 世纪 90 年代开始, 随着常规超临界发电技术的成熟以及国际社会对环境保护要求的日益严格和新材料的成功开发, 超超临界机组进入了新一轮的发展阶段。这一阶段超超临界机组的主要特点是在保证机组高可靠性、高可用率的前提下采用更高的温度和压力, 主要以日本日立、东芝、三菱和欧洲西门子、阿尔斯通等公司的技术为代表。同常规超临界机组相比, 新一代超超临界机组具有发电效率更高、污染物排放量更少的优点。就蒸汽压力、温度、机组容量而言, 这一阶段超超临界机组技术的发展主要具有以下三个方面的特点:

(1) 蒸汽压力选取值为 25MPa 左右, 蒸汽温度选取得相对较高。蒸汽温度按 50°F 为一挡划分, 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°C/610°C (其材料与 593°C 相同) 一挡。高温参数主要影响材料的选用和锅炉过热器、再热器以及汽轮机进汽段部件 (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, 近期欧洲及日本生产的新机组, 不论容量大小, 进汽温度均提高到 580~600°C。

(2) 在选取较高蒸汽温度 (600°C 左右) 的同时, 蒸汽压力也提高到 27MPa 以上, 从而获得更高的热效率。按 500PSI (3.445MPa) 为一档划分, 蒸汽压力分别提高到 27.6MPa (4000PSI)、31MPa (4500PSI)、34.5MPa (5000PSI) 这三档。压力的提高不仅关系到有关部件的材料强度及结构设计, 而且由于汽轮机低压缸排汽温度的原因, 当压力提高到某一等级后, 为保证机组的正常运行, 必须采用更高的再热蒸汽温度 (如在 31MPa 下, 温度应在 600°C 以上) 或二次中间再热循环。在目前参数下, 二次再热热效率得益约在 1.3%~1.5% 左右, 而投资将增加 10%~15%。近 10 多年以来, 提高蒸汽压力的业绩主要来源于欧洲国家。

(3) 开发更大容量的超超临界机组以及 1000MW 等级单轴超超临界机组。超大功率与汽轮机进汽超临界参数无直接关系, 它涉及的关键之一是低压缸的排汽能力, 功率越大加上背压越低, 就需要配置更大排汽面积的低压缸, 或更多的低压缸数。为尽量减少汽缸数量, 大容量超超临界机组的发展更注重大型低压缸的开发和应用, 日本几家公司以及西门子、阿尔斯通等公司在大功率机组中已经开始使用末级钛合金长叶片。进入 21 世纪以来, 1000MW 等级单轴超超临界机组已成功地投入了商业运行, 目前我国已投产的 10 多台 1000MW 等级超超临界机组均采用单轴汽轮机, 运行稳定、性能达到了国际先进水平。

第二节 国外超(超)临界机组发展状况

一、美国

美国是世界上发展超临界发电技术最早的国家,早在 20 世纪 50 年代初就开始超临界发电技术的探索和研究。目前美国超临界机组数量居世界第二位,并拥有 9 台世界上容量最大的超临界机组,单机容量为 1300MW,见表 1-2-1。

表 1-2-1 美国现役单机容量为 1300MW 的超临界机组

电 厂	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)	主蒸汽/再热 蒸汽温度 (℃)	投产时间
Cumberland 1、2 号	B&W	4535	ABB	定压	24.2	538/538	1972/1973 年
Amos 3 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1973 年 10 月
Gavin 1、2 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1974/1975 年
Mountaineer 1 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1980 年 9 月
Rckport 1、2 号	B&W	4433	ABB	定压	24.2	538/538	1984/1989 年
Zimmer	B&W	4433	ABB	定压	25.4	538/538	1991 年 3 月

世界上第一台超超临界机组于 1957 年在美国 Philo 电厂投入商业运行,该机组由 B&W 和 GE 公司设计制造,其蒸汽参数为 31MPa/621℃/566℃/566℃、容量为 125MW,采用二次中间再热。1959 年,美国 Eddystone 电厂 1 号机组投产,其蒸汽参数为 34.3MPa/649℃/565℃/565℃、容量为 325MW,采用二次中间再热。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 年起参数降至 31MPa/610℃/557℃/557℃,直至目前仍在运行。

由于超临界机组的热效率同亚临界机组相比有明显提高,因此从 20 世纪 60 年代中期开始,超临界机组在美国得到了迅速发展,新建机组容量中有一半以上为超临界机组。但由于超临界机组发展初期技术尚不够成熟,蒸汽参数选择过高,超越了当时的金属材料技术水平,导致早期投产的超临界机组事故偏多,可靠性、可用率较低,维修费用较高,加之当时超临界机组调峰能力较差,不能适应市场需要,因此到 20 世纪 80 年代以后美国超临界机组订货逐渐减少。为了提高机组可用率,美国以后发展的超临界机组多采用 24.1MPa、主蒸汽温度为 538℃、一次再热汽温多为 538℃、二次再热时汽温采用 552℃/565℃,这种蒸汽参数一直保持了 20 余年。

美国目前正在进行新一代(760℃)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超超临界机组。

美国于 2001 年启动先进超超临界发电技术研究计划,研发目标是开发蒸汽参数达到 760℃/760℃/38.5MPa 的火电机组,效率达到 46%~48%(HHV)以上。美国主要的锅炉制造商和汽轮机制造商均参与了该计划,由美国电力研究院(EPRI)和俄亥俄能源行业协

会(EIO)负责项目的管理。目前,美国已完成锅炉材料和汽轮机材料两个项目的研究。锅炉材料研究项目第一阶段(2001—2006年)完成了机组概念设计和经济性分析、先进合金材料的力学性能、蒸汽氧化和烟气腐蚀特性、可焊性与加工性能评估、涂层、设计规范等研究内容。第二阶段(2007—2009年)主要对富氧燃烧条件下实现760℃超超临界技术的可行性及锅炉材料的腐蚀特性等进行研究,以备未来与二氧化碳捕集技术相结合。汽轮机材料研究项目第一阶段(2005—2009年)确定了包括焊接和整锻转子在内的汽轮机部件候选材料,并完成了焊接转子的焊接试验。第二阶段(2009—2010年)将重点放在特殊的制造工艺性能尤其是铸造工艺方面。

二、前苏联及俄罗斯

前苏联是发展超临界机组最坚决的国家,也是当时拥有超临界机组最多的国家。1949年,前苏联投运了第一台超超临界试验机组,其锅炉容量为12t/h,蒸汽参数为29.4MPa/600℃,积累了一定的经验后便开始生产300MW超临界机组。前苏联第一台300MW超临界机组于1963年投入运行,其蒸汽参数为23.5MPa/580℃/565℃,后经改进和完善,并将蒸汽温度降低到540℃/540℃,使机组的可靠性得以提高,并在之后逐步形成了300、500、800、1200MW四个容量等级的超临界机组。前苏联生产的超临界机组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545~565℃。前苏联第一台500MW、800MW超临界机组于1968年投入运行。列宁格勒金属工厂于1978年生产了一台1200MW的K-1200-23.5-2型超临界机组,于1981年投入运行,其蒸汽参数为23.5MPa/540℃/540℃,是目前世界上容量最大的单轴汽轮发电机组,已经运行了近30年。

20世纪90年代以来,俄罗斯生产了近20台300、500、800MW的超临界机组供应给了我国和古巴。

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超临界机组,其蒸汽参数为(30~32)MPa/(580~600)℃/(580~600)℃,给水温度为300℃,当凝汽器压力为3.4~3.6kPa时,预计电厂效率可以达到44%~46%。

三、日本

日本从20世纪60年代中期开始发展超临界压力机组,主要采取的是引进、仿制、创新的技术路线。虽然起步较晚,但日本吸收了美国和欧洲的最新技术,发展速度很快,收效显著。日本第一台超临界机组是日立公司从美国B&W公司引进的蒸汽参数为24.12MPa/538℃/566℃、容量为660MW的超临界机组,于1967年在姊崎电厂投运。此外,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,1971年投运的600MW超临界机组已经有效地利用了日本自己的技术。

在成功发展超临界技术的基础上,日本进一步开发了超超临界机组。1989年6月,日本第一台超超临界机组在川越电厂投运,机组容量为700MW,采用两次中间再热,主蒸汽压力为31MPa,主蒸汽和再热蒸汽温度为566℃/566℃/566℃,机组热效率达到了41.9%。由于两次中间再热系统复杂且采用31MPa主蒸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,因此20世纪90年代以来日本各公司都转向生产高温参数的超超临界机

组, 1993 年以后日本的超超临界机组蒸汽温度逐步提高到接近 600℃。1993 年, 日本首次由 IHI 在中部电力公司碧南 3 号机组成功地运用了 593℃再热蒸汽温度; 1994 年, 容量为 600MW、蒸汽参数为 24.1MPa /566℃/593℃的东北电力公司能代 2 号机组投入运行; 1997 年, 容量为 1000MW、蒸汽参数为 24.6MPa /593℃/593℃的松浦 2 号机组投入运行; 1998 年, 容量为 700MW、蒸汽参数为 24.6MPa/593℃/593℃的七尾太田 2 号机组投入运行, 容量为 1000MW、蒸汽参数为 25MPa/600℃/600℃的三隅 1 号机组和原汀 2 号机组投入运行。目前, 日本蒸汽温度参数最高的超超临界机组是 2000 年和 2001 年投运的容量为 1050MW、蒸汽参数为 25MPa/600℃/610℃的橘湾电厂 1、2 号机组。

为了适应机组频繁快速启停的需要, 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, 使得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; 由于采用了自动化控制的启停系统和汽轮机旁路系统, 能够同时检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负荷变化速率, 成功地解决了超临界、超超临界机组快速启动和变负荷运行的问题。经过 10 多年的连续、快速发展, 日本超超临界机组的运行可靠性、经济性已跃居世界先进技术行列。日本各公司下一步的发展目标是采用奥氏体钢和镍基合金, 开发蒸汽参数为 34.5MPa/620℃/650℃的超超临界机组。

日本于 2000 年开始“700℃级别超超临界发电技术”可行性研究, 2008 年 8 月正式启动“先进的超超临界压力发电 (A-USC)”项目的研究。A-USC 计划的目标是开发 700℃级燃煤发电机组, 已确定机组参数先实现 700℃/720℃/720℃/35MPa, 最终将再热蒸汽温度提高到 750℃, 机组净热效率达到 46%~48% (HHV)。

四、欧洲

欧洲超临界机组主要分布在德国、意大利、荷兰和丹麦。

德国是发展超临界技术最早的国家之一。1956 年, 德国投运了一台容量为 88MW、蒸汽参数为 34MPa/610℃/570℃/570℃的超超临界机组, 但这种机组因容量较小, 未获得很大的发展; 1972 年投运了一台容量为 430MW、蒸汽参数为 24.5MPa/535℃/535℃的超临界机组, 1979 年投运了一台容量为 475MW、蒸汽参数为 25.5MPa/530℃/540℃/530℃的超临界机组。

德国开发了螺旋管圈式水冷壁锅炉, 实现了超临界锅炉的滑压运行, 目前在欧洲和日本的全滑压运行超临界机组中广泛采用了这类锅炉。德国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, 其中具有代表性的超临界机组是: ①1992 年 8 月在 Staudinger 电厂投运的容量为 500MW、蒸汽参数为 25MPa/540℃/560℃的超临界机组; ②1999 年在 Lippendorf 电厂投运的容量为 930MW、蒸汽参数为 26MPa/550℃/580℃的超超临界机组; ③2000 年在 Niederausem 电厂投运的容量为 1025MW、蒸汽参数为 26.5MPa/576℃/599℃的超超临界机组和在 Hessler 电厂投运的容量为 700MW、蒸汽参数为 30MPa/580℃/600℃的超超临界机组。

丹麦于 1997 年、1998 年投运了两台容量为 411MW、蒸汽参数为 29MPa/582℃/580℃/580℃的二次中间再热超超临界机组, 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)。2000 年投运了一台容量为 410MW、蒸汽参数为 30.5MPa/582℃/600℃的超超临界机组, 机组设计效率为 49%, 是世界上迄今为止热效率最高的火电机组。

从 1983 年开始, 欧洲实施了 COST501 计划和 COST522 计划, 其目标分别是建立蒸汽参数为 29.4MPa/600℃/600℃、29.4MPa/600℃/620℃的超超临界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“Thermie700 计划”, 其目的是论证和准备发展具有先进蒸汽参数的未来燃煤电厂形式, 其中关键部件将采用镍基高温合金。“Thermie700 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℃, 从而使机组热效率达到 52% (内陆地区冷却塔方式) 至 55% (海水冷却方式), 使 CO₂ 的排放量降低 15%, 并降低燃煤电厂的投资。能否实现上述目标取决于技术方面的发展。

“Thermie700 计划”的核心是发展新材料, 这是该计划能否成功的关键。材料问题解决后, 厚壁管道将不再使用 P91 钢, 而是使用持久强度及抗蠕变性能更好的镍基高温合金新材料, 这将使汽水循环受热面金属材料的最高温度由目前的 600~620℃提高到 700~720℃。镍基高温合金曾因应用在燃气轮机和核电方面为人们所熟悉, 它可以解决厚壁部件、高温强度、高温腐蚀、蒸汽氧化和工程造价等方面的问题。同时, “Thermie700 计划”为了减少镍基高温合金的使用, 还确立了奥氏体钢和铁素体钢的发展计划。如果“Thermie700 计划”获得成功, 将使燃煤电厂发电净效率达到约 52%, 并将彻底改进火力发电的劣势。“Thermie700 计划”的战略意义是使欧洲火电厂的技术水平处于世界领先水平, 所以又被欧洲称为“先进的超超临界项目”。

第三节 我国超(超)临界机组发展状况

我国的能源结构决定了我国电力工业以煤电为主的格局在较长时期内不会发生大的改变。因此, 发展高效的超临界、超超临界火力发电机组是近期和未来一段时期内提升我国电力工业装备水平和发展水平的必然选择。

20 世纪 90 年代, 我国引进了一批超临界火力发电机组。经过十幾年来的运行实践和不断的研究、总结, 为我国发展国产化超临界火力发电机组积累了宝贵的经验。1992 年华能石洞口第二发电厂 2×600MW 进口超临界机组的投产, 标志着我国拥有了高效发电机组, 同时对我国发展超临界机组积累了丰富的运行经验, 起到了积极地推动作用。截至 2004 年我国共进口超临界机组 20 台, 总装机容量为 11400MW, 并全部投产。引进超临界机组锅炉概况见表 1-3-1。

表 1-3-1

引进超临界机组锅炉概况

电 厂	容 量 (MW)	参 数	锅炉布 置型式	燃烧方式	水冷壁型式	锅炉制造商
华能石洞口 第二发电厂	2×600	25.4/541/569	Ⅱ 型	四角切圆燃烧	螺旋管圈	瑞士 Sulzer + 美国 GE

续表

电 厂	容 量 (MW)	参 数	锅炉布 置型式	燃烧方式	水冷壁型式	锅炉制造商
华能南京电厂	2×300	25/545/545	Ⅱ型	对冲燃烧	垂直管屏	前苏联
华能营口电厂	2×300	25/545/545	Ⅱ型	对冲燃烧	垂直管屏	前苏联
华能伊敏电厂	2×500	25/545/545	T型	八角单切圆燃烧	垂直管屏	前苏联
盘山电厂	2×500	25/545/545	T型	对冲燃烧	垂直管屏	前苏联
绥中电厂	2×800	25.3/545/545	T型	对冲燃烧	垂直管屏	前苏联
后石电厂	6×600	26.32/542/568	Ⅱ型	八角双切圆燃烧	螺旋管圈	日本三菱
外高桥电厂	2×900	25.8/542/568	塔型	四角切圆燃烧	螺旋管圈	德国 Alstom

我国超临界、超超临界锅炉技术都采用了引进或合作方式。各锅炉制造厂的技术合作方见表 1-3-2。

表 1-3-2 锅炉制造厂的技术合作方

序号	制造厂	超临界机组 技术支持方	超超临界机组 技术支持方	合作方式
1	哈尔滨锅炉厂有限公司	三井巴布科克	三菱重工(MHI)	引进技术
2	上海锅炉厂有限公司	阿尔斯通公司(ALS-TOM)	阿尔斯通公司(ALS-TOM)	技术转让
3	东方锅炉(集团)股份有限公司	巴布科克日立公司(BHK)	巴布科克日立公司(BHK)	东方日立(BHDB)是东锅和 BHK 的合资公司, BHK 负责基本设计
4	北京巴布科克·威尔科克斯有限公司	美国巴布科克·威尔科克斯公司(B&W)	美国巴布科克·威尔科克斯公司(B&W)	北京巴威是美国 B&W 在中国的合资公司, 采用 B&W 技术
5	武汉锅炉股份有限公司	阿尔斯通公司(ALS-TOM)		技术转让

随着国家优先发展“节能降耗”型工业这一宏观战略目标的提出和实施,超临界、超超临界火力发电技术在国内得到了大力推进和迅速发展。在“十五”期间,我国首台 600MW 超临界机组示范工程投入运行,1000MW 超超临界机组的研究和开发也在积极进行。“十五”末期,国家出台了一系列鼓励建设大型超超临界机组的相关配套政策,大型超超临界机组在我国呈现出快速发展的趋势。国产“600MW 超临界火电机组成套设备研制”是从 1995 年开始进行前期科研和立项工作,2000 年获得国家批准,被列为国家“十五”重点科技攻关计划,明确华能沁北电厂(2×600MW)作为 600MW 超临界参数火电设备国产化的依托工程。2004 年 11 月和 12 月两台国产 600MW 超临界机组在华能沁北电厂相继投产,各项指标均达到设计值,最长连续运行时间 255 天。2002 年我国决定发展“超超临界燃煤发电技术”,被科技部列为“十五”863 计划,华能玉环电厂 1000MW 超超临界机组为依托工程。华能玉环电厂一期 2×1000MW 超超临界机组分别于 2006 年 11 月和 12 月投产,各项指标均达到国内最先进水平。

首台国产化 600MW 超临界机组在华能沁北电厂成功投入商业运行, 掀开了我国火电工业建设的新篇章。从“十一五”初期开始, 我国大型超(超) 临界机组即呈现出快速发展的趋势, 600MW 机组基本上都采用了超临界或超超临界参数, 1000MW 机组全部采用了超超临界参数。2006 年 11 月, 我国首台 1000MW 超超临界机组在华能玉环电厂成功投入商业运行; 同年 12 月, 华电邹县电厂 1000MW 超超临界机组亦成功投入商业运行。截至 2009 年 6 月, 我国已投产超超临界机组 23 台, 其中 1000MW (100 万 kW) 机组 13 台, 600MW (60 万 kW) 级机组 10 台, 超(超) 临界机组容量占火电装机容量的 18% 以上, 已提前达到了“十一五”目标——超(超) 临界机组占煤电装机容量的比重达到 15%。目前, 还有一批超超临界机组已经国家核准正在建设或筹备建设中。

从主机水平来看, 目前, 我国超超临界机组按容量通常可以分为 600MW 等级和 1000MW 等级, 从初参数上可分为 25MPa/600℃/600℃ (东方电气、哈尔滨电气) 和 26.25MPa/600℃/600℃ (上海电气) 2 种。自 2004 年 6 月以来, 华能玉环电厂、华电国际邹县发电厂、国电泰州电厂、上海外高桥第三发电厂、国电北仑电厂等已先后建成投运了 1000MW 超超临界机组。这些 1000MW 超超临界机组自投运以来, 各项主要性能参数均能符合设计选型要求, 性能考核实测值基本满足签订的设备合同中的性能数据。我国超超临界机组的单机容量、参数和数量均已达到国际先进水平, 600~1000MW 等级的超超临界机组大部分的进汽参数: 压力为 24.2~28MPa、温度为 580~600℃。世界上最大容量超超临界机组是 1300MW 的双轴机组, 单轴机组最大容量为 1050MW。大多数机组采用一次再热循环, 少数采用二次再热循环。

从电厂系统设计技术水平来看, 随着我国 1000MW 超超临界电厂的陆续投产和稳定运行, 标志着我国电力设计行业已掌握了世界先进的火力发电设计技术, 具备了 1000MW 级超超临界电厂全部自主设计的能力。1000MW 级超超临界电厂设计初期, 在没有引进国外设计技术的情况下, 国内电力设计单位依靠自主力量, 通过结合具体工程, 从我国现有设计规程适应性、电厂系统拟定原则、辅机选择原则及国产化能力、四大管道材料选择和设计原则、汽水品质指标及控制要求、汽轮发电机组基座设计等诸多方面展开一系列研究, 研究成果在依托工程中得到了成功的应用和检验, 标志着我国大型超超临界电站设计技术已走向成熟, 并达到了国际先进水平。

从设备设计制造水平来看, “十五”期间, 国内三大动力集团 (上海电气、东方电气、哈尔滨电气) 分别从三菱、日立、阿尔斯通、西门子引进了超临界、1000MW 超超临界技术, 并采取与国外公司合作的方式进行 1000MW 超超临界机组的设计和制造。三大集团先后扩大了厂房, 装备了数百台加工精度高、工效快的数控设备, 在装备水平上达到了发达国家的先进水平, 均具备了 600MW 等级和 1000MW 等级的超超临界机组制造能力。600MW 超超临界机组, 除耐高温合金钢、高压转子和部分高温及专用阀门须进口外, 其他设备已能实现制造国产化。在机组性能设计方面, 目前三大动力集团先后完成了 600MW、1000MW 超超临界火电机组的自主设计。

据不完全统计, 到 2011 年 6 月, 国内主机制造厂销售及订货的超临界、超超临界机组超过 300 多台套; 其中, 1000MW 级超超临界机组超过 100 台套, 机组容量超

过 114.47GW。

2011 年 6 月, 哈尔滨锅炉厂获取了我国迄今为至单机容量最大的超超临界锅炉项目——新疆农六师煤电有限公司 $4 \times 1100\text{MW}$ 超超临界褐煤锅炉项目订单, 该项目的签订树立了我国电厂锅炉领域新的里程碑, 标志着我国褐煤资源利用取得重大突破, 也标志着我国褐煤发电技术达到世界一流水平。

为了进一步降低能耗, 减少 CO_2 排放、改善环境, 在材料技术发展的支持下, 超临界机组正在朝着更高参数的超超临界的方向发展。欧洲、美国和日本等发达地区和国家基于其自身的技术、经济状况以及能源结构和环保要求, 已相继启动了 700°C 等级的高超超临界机组发展计划, 确定了较详细的目标和发展步骤, 组织了实力雄厚的科研和制造企业开展研究, 并已取得了一些重要成果。

国家科技部已将 700°C 列入“十二五”规划, 重点组织开展技术研究。2010 年 7 月 23 日, 国家能源局在北京成立了“国家 700°C 超超临界燃煤发电技术创新联盟”, 宗旨是通过对 700°C 超超临界燃煤发电技术的研究, 有效整合各方资源, 共同攻克技术难题, 提高我国超超临界机组的技术水平, 实现 700°C 超超临界燃煤发电技术的自主化, 带动国内相关产业的发展, 为电力行业的节能减排开辟新路径。

700°C 高超超临界发电技术是指主蒸汽温度和再热蒸汽温度达到或超过 700°C 的先进超超临界燃煤发电技术。按照当今世界上主要发达地区 and 国家的 700°C 计划, 主蒸汽压力约为 $35 \sim 38.5\text{MPa}$ 。

为了进一步提高超超临界发电机组的效率, 首先研究在现有参数条件下效率的提高, 如采用二次再热、降低排汽背压、锅炉排烟余热利用、降低管道压损、提高给水温度、优化辅机配置选型等技术措施, 提高效率。同时, 根据耐高温材料的发展情况和我国超超临界设备研发、制造能力, 国内超超临界机组蒸汽参数的提高可以考虑分阶段实施, 如 $28\text{MPa}/620^\circ\text{C}/620^\circ\text{C}$ 、 $31\text{MPa}/650^\circ\text{C}/650^\circ\text{C}$ 、 $34.5\text{MPa}/700^\circ\text{C}/700^\circ\text{C}$ 等。

预计 2030 年前, 我国自主开发的新一代 700°C 超超临界燃煤机组将投入商业运行, 机组供电效率将超过 50% 。

第二章

超(超)临界机组的主要形式及特点

第一节 超(超)临界锅炉

一、超临界、超超临界锅炉炉型

超临界、超超临界煤粉锅炉的整体布置主要采用Ⅱ型和塔式两种，也有T型布置方式，如图2-1-1所示。我国引进的前苏联超临界机组（伊敏、盘山电厂500MW，绥中电厂800MW等）锅炉采用T型布置，石洞口二厂、后石电厂引进的600MW超临界机组锅炉采用Ⅱ型布置，外高桥发电厂引进的900MW机组超临界锅炉采用的是塔式布置。锅炉采用某种布置方式往往取决于锅炉厂家的传统技术，同时，也有经济性方面的考虑。美国800～1300MW超临界机组的UP炉，CE型、FW型锅炉采用Ⅱ型布置；ALSTOM公司生产的

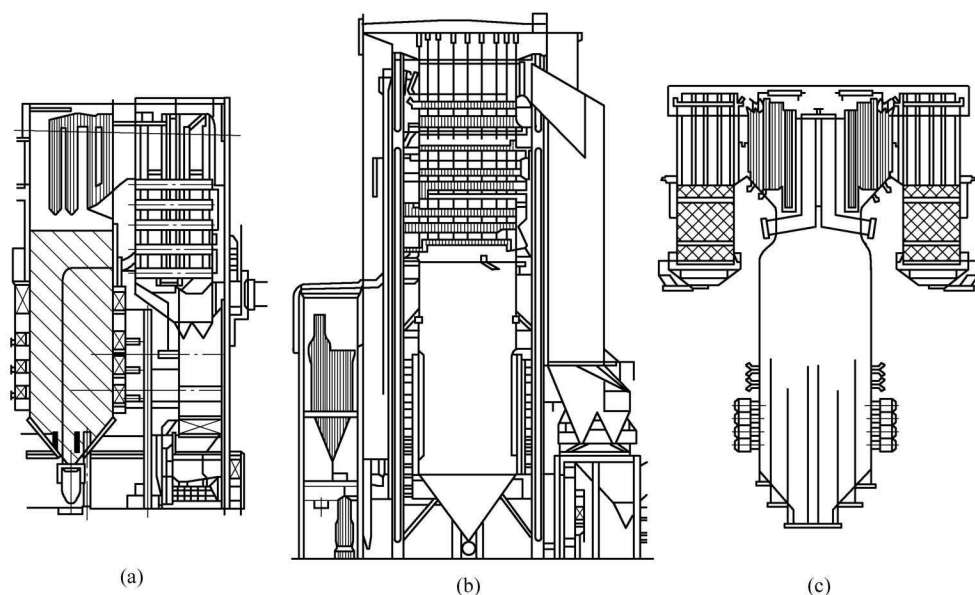


图 2-1-1 超临界、超超临界锅炉三种布置方式

(a) Ⅱ型布置；(b) 塔式布置；(c) T型布置