



电力科技专著出版资金资助项目

Ultra-supercritical Coal-fired
Power Generation Technology

超超临界 燃煤发电技术

张晓鲁 杨仲明 王建录 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION



电力科技专著出版资金资助项目

Ultra-supercritical Coal-fired
Power Generation Technology

超超临界 燃煤发电技术

张晓鲁 杨仲明 王建录 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

超超临界燃煤发电技术通过提高蒸汽参数来提高机组的热效率、降低供电煤耗,是一种高效、先进、易规模化应用的洁净煤发电技术。

本书综合、凝练“超超临界燃煤发电技术”研究项目的成果,并结合超超临界机组的设计、制造和运行经验,从锅炉、汽轮机、机组系统以及运行与维护等几个方面,深入介绍了超超临界燃煤发电的关键技术,主要包括典型的超超临界锅炉、超超临界锅炉的整体布置、超超临界锅炉的控制系统和启动系统、超超临界汽轮机的技术特点、超超临界汽轮机的关键技术、典型的超超临界汽轮机、超超临界机组典型系统、超超临界机组运行技术、用于超超临界机组的新型耐热钢材料等内容,并展望了超超临界燃煤发电技术的发展趋势。

本书内容全面,论述充分,适合发电设备制造企业的研发设计人员,电力企业的管理、建设和运行人员,以及其他从事燃煤发电、环境保护等相关工作的科研技术人员阅读使用,也可作为高等院校热能动力类专业的参考图书。

图书在版编目(CIP)数据

超超临界燃煤发电技术/张晓鲁等编著. —北京:中国电力出版社,2014.9

ISBN 978-7-5123-4326-9

I. ①超… II. ①张… III. ①燃煤锅炉-火力发电 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第101520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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年9月第一版 2014年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19印张 467千字

印数0001—3000册 定价68.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

《超超临界燃煤发电技术》 编 写 组

组 长 张晓鲁

副 组 长 杨仲明 王建录

编写人员 (按姓氏笔画排序)

王平子 刘恒宇 李光华

吴少华 陈晓利 范 华

赵丰宇 崔 凯 商 宇

序

我国以煤为主的能源利用格局将长期存在，这决定了在相当长的时间内，电力工业都将以燃煤发电为主。因此，提高燃煤机组的效率、降低污染物排放是燃煤发电技术进步永恒的主题，也是我国发电结构调整的首要任务。为实现我国电力工业的持续快速发展，迫切需要污染排放小、发电效率高、可以形成规模化应用的洁净煤发电设备来装备电力工业。

2000年，我们主持研究制定“十五”电力科技发展规划时提出，新一代的发电设备，应具备可靠、大型、高效、清洁、投资低等特点，能够成为装备电力工业的主流机型；同时国内设备制造企业经过努力后能够具备生产能力，形成规模生产和市场竞争局面。当时，我国电力工业的主力机组为300MW亚临界机组，国产600MW超临界机组尚未开工建设，而国际上也仅有少量的超超临界机组投入运行。

此时有两种选择，一是等待超临界机组国产化示范工程建成、国内装备制造企业逐步完善技术后再去考虑超超临界发电技术的研究工作；二是迈出跨越性的一步，研究制定我国发展超超临界技术的技术路线，组织科技攻关并力争实现突破，从而缩短我国电站装备制造业与国际先进水平的差距，实现跨越式发展。经过认真的调查与研究，以“开发可供电力行业升级换代用的清洁高效大型燃煤发电设备”为攻关目标，开始了“超超临界燃煤发电技术”的前期论证与研究。2002年，国家科技部将“超超临界燃煤发电技术”列入“十五”国家863计划重点项目，正式启动了超超临界燃煤发电技术的研发工作。

作为项目组长，张晓鲁率领研究团队对当时国际国内的技术水平，尤其是我国电站装备制造业和冶金工业的现状进行了详细的分析和广泛的论证，在此基础上提出了我国在21世纪初发展超超临界燃煤发电技术的技术选型方案：即机组容量600MW级和1000MW级，采用一次再热、蒸汽参数为25~28MPa/600℃/600℃，要求机组建设时必须同步配套建设脱硫脱硝装置；同时明确提出了目标机组应达到的发电净效率、环保排放指标及机组可靠性等一系列关键技术指标。

电力企业、三大动力设备制造企业和设计院、科研院所、高等院校等23个国内权威单位，合作开展联合攻关，历经五年的研究与实践，完成了三种不同形式的超超临界锅炉和汽轮机的实践开发、制造软件包研制和材料加工性能研究，自主设计、建设、运行了600MW级和1000MW级超超临界机组，形成了我国完整的超超临界电站的开发体系。

2005年，国家发改委采纳项目研究成果，要求新建600MW以上燃煤机组达到超超临界机组的煤耗指标。2006年11月28日，项目的依托工程、我国首台超超临界燃煤发电机组——华能玉环电厂1号机组正式并网运行，示范机组供电煤耗达到286g/kWh，比2006年全国平均供电煤耗366g/kWh降低80g/kWh，CO₂、NO_x和烟尘的排放相应大幅减少。2008年，“超超临界燃煤发电技术”项目以国际先进、国内领先的研究成果，获得国家科技进步一等奖。

良好的示范作用使得超超临界燃煤发电技术被电力行业和机械行业广泛接受。在电力需求强劲增长和国家节能减排政策的双重驱动下，超超临界燃煤发电技术迅速得到推广。可喜的是，超超临界燃煤发电技术在大规模推广的同时，又有了诸多新的发展，如超超临界空冷技术、二次再热技术等，进一步提高了发电效率，拓宽了应用范围。

目前，我国超超临界机组的技术水平、发展速度、装机容量和机组数量均居世界先进行列。截至 2013 年底，我国已投入商业运行的超超临界机组总容量已超过 1 亿 kW。随着超超临界机组的投运，我国的燃煤发电装机结构也得到进一步优化，显著地降低了燃煤消耗和污染物的排放。据统计，2013 年我国燃煤发电机组平均供电煤耗为 321g/kWh，比 2000 年整体下降了 71g/kWh。在燃煤发电量比 2000 年增加 3 倍多的情况下，全国燃煤发电主要污染物的排放总量基本控制在 2000 年的水平。

特别值得一提的是，“超超临界燃煤发电技术”项目在攻关过程中，以“电力企业牵头、制造企业紧密合作，产学研用相结合、自主研发与国际合作相结合”为指导思想，大大加快了新技术的研发进程，促进了研究成果迅速转化为生产力。这种做法，为其他大型研究项目提供了值得借鉴的经验。

现在，张晓鲁组织项目主要研究人员编著了《超超临界燃煤发电技术》一书。该书综合、凝练了当年的研究成果，并结合近年来国内超超临界机组设计、制造、建设与运行的经验，对超超临界燃煤发电关键技术作了全面、深刻的阐述，同时分析了超超临界燃煤发电技术的发展趋势。

这本书的出版，将对提高我国超超临界燃煤发电技术水平和装备制造业技术水平、加快火力发电机组的结构优化，起到积极的推进作用。更希望以这本书的出版为契机，加快新的燃煤发电技术的研究与应用，为我国经济发展提供更充沛的电力保障。

陸延昌

2014 年 7 月

前言

工程热力学中将水的临界状态点的参数定义为：压力为 22.125MPa，温度为 374.15℃。当水蒸气参数值大于临界状态点的参数时，称其为超临界参数。

在燃煤发电技术中，亚临界机组的典型参数为主蒸汽压力 16.7MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 538℃/538℃；超临界机组的典型参数为主蒸汽压力 24.1MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 538℃/566℃；而超超临界是在超临界机组的基础上进一步提高蒸汽初参数（蒸汽压力和温度）。国际上通常把主蒸汽压力为 25~31MPa、主蒸汽温度为 580~610℃的机组定义为 600℃等级的超超临界机组；我国将超超临界机组的参数定义为：主蒸汽压力高于 27MPa 或主蒸汽温度高于 580℃。

超超临界燃煤发电技术将水蒸气的压力和温度提高到超超临界参数，从而大幅度提高机组的热效率，降低供电煤耗。配有脱硫、脱硝、除尘等烟气污染物排放控制装置的超超临界发电技术，是一种高效、先进、易规模化应用的洁净煤发电技术。

2000年，原国家电力公司启动了“超超临界燃煤发电技术”的前期论证与研究工作，其主要目标是开发可供电力行业升级换代用的清洁高效大型燃煤发电设备，为电力工业提供可替代 300MW 和 600MW 亚临界机组的升级换代的主力机组，满足我国发电行业快速发展、急需更高效燃煤发电机组的要求。2002年，“超超临界燃煤发电技术”列入国家科技部“十五”国家 863 计划重点项目，2006年顺利完成了全部研发内容；1000MW、600MW 超超临界示范机组相继投产，性能考核指标均优于设计值，“超超临界燃煤发电技术”项目成果获得了 2007 年度的国家科技进步一等奖。截至 2013 年底，我国已投入商业运行的超超临界机组的装机容量达到 1.05 亿 kW。我国超超临界机组的技术水平、发展速度、装机容量和机组数量均已跃居世界前列。

本书依托“超超临界燃煤发电技术”的项目成果，并结合国内超超临界机组的设计、制造和运行经验，从锅炉、汽轮机、机组系统以及运行与维护等几个方面，深入介绍了超超临界燃煤发电的关键技术，主要包括国内外超超临界燃煤发电技术的发展历程和现状，典型的超超临界锅炉，超超临界锅炉的整体布置，超超临界锅炉的控制系统和启动系统，超超临界汽轮机的技术特点，超超临界汽轮机的关键技术，典型的超超临界汽轮机，超超临界机组典型系统，超超临界机组运行技术，用于超超临界机组的新型耐热钢材料的性能、制造工艺和技术监督，超超临界燃煤发电技术展望等内容。希望本书能为发电设备制造企业的研发设计人员，电力企业的建设、运行和管理人员，以及其他从事燃煤发电、环境保护等相关工作的科研技术人员了解超超临界燃煤发电技术提供全面而详尽的参考。

本书在写作过程中，主要参考了“十五”国家 863 项目“超超临界燃煤发电技术”的研究报告，在此对参与项目研发的所有单位和人员表示感谢。本书的出版，获得了国家出版基金和电力科技专著出版资金的资助；在编写过程中，中国电力投资集团公司、哈尔滨锅炉厂

有限责任公司、东方电气集团东方汽轮机有限公司等单位提供了大力支持；西安热工研究院原副总工程师危师让对全书进行了仔细的审校，提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示感谢。限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

编 者

2014年7月



目 录

序 前言

第一章 概述	1
第一节 国外超超临界燃煤发电技术的发展和现状.....	1
第二节 我国超超临界燃煤发电技术的发展和现状.....	5
第二章 超超临界锅炉技术和典型炉型	10
第一节 超超临界锅炉技术	10
第二节 超超临界锅炉的典型炉型	16
第三章 超超临界锅炉的整体布置	30
第一节 超超临界锅炉水冷壁	30
第二节 超超临界锅炉过热器和再热器	46
第三节 超超临界锅炉的燃烧系统	54
第四章 超超临界锅炉控制系统和起动系统	64
第一节 超超临界锅炉的控制系统	64
第二节 超超临界锅炉起动系统	70
第五章 超超临界汽轮机的特点和主要系统	76
第一节 超超临界汽轮机的特点	76
第二节 超超临界汽轮机的总体结构布置	78
第三节 超超临界汽轮机的主要系统	81
第四节 超超临界汽轮机辅助系统	82
第六章 超超临界汽轮机的关键技术	90
第一节 喷嘴静叶防固体微粒侵蚀	90
第二节 超超临界汽轮机冷却	97
第三节 汽流激振.....	103
第四节 汽轮机部件的强度、稳定性和流动分析.....	105
第五节 汽轮机末级长叶片.....	118
第七章 典型的超超临界汽轮机	130
第一节 典型的 1000MW 等级超超临界汽轮机	130
第二节 典型的 600MW 等级超超临界汽轮机.....	143
第三节 典型的 1000MW 超超临界空冷汽轮机	145

第八章 超超临界机组典型系统	155
第一节 一次中间再热机组系统.....	155
第二节 二次中间再热机组系统.....	159
第三节 直接空冷机组系统.....	166
第四节 超超临界机组的烟气净化技术.....	168
第九章 超超临界机组的运行技术	170
第一节 超超临界机组的起动.....	170
第二节 超超临界机组动态特性及控制技术.....	185
第三节 超超临界机组的水汽特点及化学运行控制.....	191
第四节 超超临界机组变负荷运行.....	195
第五节 超超临界机组主要辅机的运行优化.....	201
第十章 超超临界机组材料性能和制造工艺	208
第一节 超超临界锅炉选用的金属材料和制造工艺.....	208
第二节 超超临界汽轮机材料性能和制造工艺.....	222
第三节 高温管材的焊接技术.....	252
第十一章 超超临界机组的金属监督评价与维护	259
第一节 高温部件失效原理.....	259
第二节 锅炉部件监督评价与维护.....	262
第三节 汽轮机部件监督评价与维护.....	266
第十二章 超超临界发电技术展望	271
第一节 超超临界发电技术的发展趋势.....	271
第二节 超超临界锅炉的技术发展展望.....	278
第三节 超超临界汽轮机技术的发展展望.....	282
参考文献	289
索引	291

概 述

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，也是世界上少数几个以煤炭为主要一次能源的国家之一。其中，电力工业煤炭消耗量占工业部门煤炭消耗总量的一半以上，燃煤发电量长期占全国总发电量的 80% 左右，我国以燃煤发电为主的发电格局在相当长的时期内难以发生根本改变，燃煤发电的清洁高效利用潜力巨大。提高能源利用效率、保护环境与资源是我国电力工业技术发展的永恒主题。对发电行业而言，关键在于发展大容量、高参数、高效率、低污染的先进燃煤发电技术。从我国国情、技术水平和发展趋势等方面综合考虑，积极开发超超临界技术、同时配套开发烟气排放污染物控制技术是实现我国燃煤发电可持续发展的根本保证。超超临界燃煤发电技术是一种大容量、高参数、高效率、低污染、技术成熟、易规模化应用的先进燃煤发电技术。目前，超超临界机组已成为我国电力工业新增装机的的主力机组。

第一节 国外超超临界燃煤发电技术的发展和现状

一、超超临界燃煤发电技术的特点

工程热力学将水的临界状态点的参数定义为：压力 22.125MPa，温度 374.15℃。当水蒸气参数值大于临界状态点的压力和温度值时，称其为超临界参数。亚临界机组的典型参数为主蒸汽压力 16.7MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 538℃/538℃；超临界机组的典型参数为主蒸汽压力 24.1MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 538℃/566℃。

而超超临界机组是在超临界机组参数的基础上进一步提高蒸汽初参数（蒸汽压力和温度）。国际上通常把主蒸汽压力为 25~31MPa、主蒸汽温度为 580~610℃ 的机组定义为 600℃ 等级的超超临界机组。具体到各国、甚至各公司，则对超超临界参数的起始点定义有所不同，例如，日本的定义为主蒸汽压力大于 24.2MPa，或主蒸汽温度达到 593℃；丹麦的定义为主蒸汽压力大于 27.5MPa；西门子公司的观点是应从材料的等级来区分超临界和超超临界机组，等等。我国则将超超临界机组的参数定义为：主蒸汽压力高于 27MPa 或主蒸汽温度大于 580℃。

“十五”国家 863 计划重点项目“超超临界燃煤发电技术”在系统分析我国超超临界机组的用钢状况、机组参数、容量、结构型式、热力系统和运行性能等因素的基础上，提出了我国发展超超临界机组的选型参数：主蒸汽压力 25~28MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度为 600℃/600℃，机组容量为 1000MW 等级和 600MW 等级；采用一次中间再热，配套建设脱硫脱硝装置。

蒸汽参数越高，热力循环效率越高，这已被朗肯循环原理证明。因此，提高燃煤发电机组的蒸汽参数是提高机组效率的有效方法。超超临界发电技术就是将水蒸气的压力和温度提高到超临界参数以上，从而大幅度提高机组的热效率，降低供电煤耗，并减少污染物的排放。

表 1-1 不同参数下燃煤发电机组的效率和供电煤耗

机组类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (°C)	热效率 (%)	供电煤耗 (g/kWh)
亚临界	16.7	538/538	38	324
超临界	24.1	538/566	41	300
超超临界	25~31	600/600	45	280

表 1-1 是不同参数燃煤发电机组的热效率和供电煤耗的比较，由表可以明显地看出，与亚临界机组相比，超超临界机组在经济性方面有较大的提高。

由于蒸汽压力和温度提高，使得锅炉和汽轮机工作条件和材料发生变化，这是超超临界机组与超临界机组、亚临界机组的主要区别。锅炉和汽轮机的高温部件采用了新型的高温耐热钢。与锅炉、汽轮机相比，发电机的工作条件没有发生变化，其出力主要取决于锅炉和汽轮机的容量。除此之外，超超临界机组与超临界机组和亚临界机组在热力系统上基本相同。

国际上正在研发、推广的洁净煤发电技术主要包括配有污染物排放控制技术的超超临界发电技术、循环流化床燃烧发电技术 (CFBC) 以及整体煤气化联合循环发电技术 (IGCC) 等。

各种洁净煤发电技术的发展前景主要取决于热效率、环保性能、设备可靠性及技术继承性等指标。21 世纪初，我国首次对这些技术进行了全面的技术经济比较，作出了我国洁净煤发电技术的重大战略选择。表 1-2 列出了这三种洁净煤发电技术的主要技术经济比较。

表 1-2 主要洁净煤发电技术的技术经济比较

洁净煤发电技术	效率 (%)	容量 (MW)	环保性能	设备可靠性	技术成熟程度	技术继承性	单位千瓦造价	业绩
超超临界+污染物排放控制技术	43~47	1000	优	最高	成熟	最好	最低	批量化应用
循环流化床燃烧 (CFBC)	38~40	300	一般	中等	基本成熟	好	较低	初步批量化
整体煤气化联合循环 (IGCC)	43~45	300	最优	低	接近商业化	低	最高	少量商业化

由表可知，在效率、容量、可靠性、技术成熟度、技术继承性、单位千瓦造价、业绩等指标对比中，超超临界燃煤发电技术均处于首位。

二、超临界和超超临界燃煤发电技术的发展历程

从 20 世纪 50 年代开始，以美国和德国等为主的工业化国家已经开始对超临界和超超临界发电技术进行研究。经过半个多世纪的不断研究、发展和完善，超临界和超超临界燃煤发电技术已进入了成熟商业化运行的阶段，其发展过程大致可以分成三个主要阶段。

第一阶段。从 20 世纪 50 年代开始，主要以美国、德国、俄罗斯和随后的日本等国的技术为代表，发展的起步参数就是超超临界参数。例如，美国费洛 (Philo) 电厂 6 号机于 1957 年投产，这是世界上第一台超超临界机组，容量为 125MW，主蒸汽压力为 31MPa、蒸汽温度为 621°C/566°C/566°C，二次中间再热。锅炉由巴威 (B&W) 公司制造，汽轮机由通用电气公司 (GE) 生产。1959 年，埃迪斯通 (Eddystone) 电厂 1 号机组投产，容量为 325MW，蒸汽压力为 34.3MPa，蒸汽温度为 649°C/565°C/565°C 的二次中间再热机组，热

耗率为 8630kJ/kWh, 由燃烧工程公司 (Combustion Engineering) 和西屋公司 (Westinghouse) 设计制造。但由于所采用的蒸汽参数超越了当时材料技术的实际发展水平, 导致了诸如机组运行可靠性较差等问题的发生。在经历了初期过高的超临界参数后, 从 20 世纪 60 年代后期开始, 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 (24~27MPa)。直至 20 世纪 80 年代, 美国超临界机组的参数基本稳定在这个水平。

第二阶段。从 20 世纪 80 年代初期开始, 由于材料技术的进步和发展, 尤其是锅炉和汽轮机材料性能的大幅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问题。同时, 美国对已投运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。在此期间, 美国又将超临界技术转让给日本, 联合进行了一系列新的超临界参数电厂的开发设计。同时, 欧洲也进行了相应的研究开发。在这个阶段, 超临界机组的市场逐步转移到了欧洲及日本, 并涌现出了一批新的超临界机组。

第三阶段。大致是从 20 世纪 90 年代开始, 国际上超超临界机组进入了快速发展的阶段, 即在保证机组可靠性、高可用率的前提下采用更高的蒸汽温度和压力。由于日益严格的环保要求, 同时新材料的开发成功和常规超临界技术的成熟, 为超超临界机组的发展提供了条件。具有代表性的是日本和欧洲的技术。

经过五十多年的不断完善和发展, 目前超临界和超超临界机组的发展已进入了成熟和实用阶段, 具有更高参数的超超临界机组也已成功投入商业运行。

三、超超临界燃煤发电技术的几个重要问题

根据发达国家在发展超超临界发电技术发展过程中的经验与教训, 我国发展超超临界技术应重点解决机组参数选择、材料的应用与选择、机组容量选择、再热形式选择等方面的问题。

1. 机组参数选择

热力循环分析表明, 在主蒸汽压力 16.3~31MPa、温度 535~600℃ 范围内, 主蒸汽压力每提高 1MPa, 机组热效率上升 0.18~0.29 个百分点; 主蒸汽温度或再热蒸汽温度每提高 10℃, 机组热效率上升 0.25~0.3 个百分点。因此, 提高超超临界机组的热效率可以通过提高蒸汽压力或提高蒸汽温度来实现。

目前, 超超临界机组在参数选择上表现出两种趋势: 一种是以日本的技术为代表, 通过提高蒸汽温度, 从而获得更高的效率, 如日本橘湾 (Tachibanawan) 电站, 分别于 2000 年和 2001 年相继投运了两台 1050MW 单轴超超临界机组, 其蒸汽参数为 25MPa/600℃/610℃, 净效率分别为 42.1% 和 41.7%。另一种是以欧洲的技术为代表, 通过提高蒸汽压力, 从而获得更高的效率。如丹麦在 20 世纪 90 年代投产了参数为 29MPa/580℃/580℃/580℃, 带二次中间再热的 400MW 超超临界机组, 净效率达 45.3%; 2000 年又投产的相同容量的超超临界机组, 参数为 30MPa/580℃/600℃, 净效率达 49%。

另外, 世界上先进的超超临界机组的发展经验表明, 机组效率的提高除了由于参数提高的原因外, 还可能来源于其他许多方面的因素, 如锅炉较低的排烟温度和较高的燃烧效率, 高效率的主、辅机设备, 较低的凝汽器压力, 较低的系统压力损失等。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净效率总提高量的一半左右。因此, 发展超超临界机组的工作, 不仅仅是简单地提高蒸汽参数就可以实现的, 还必须同时注重其他相关技

术的研究和开发工作，需特别强调的是：提高参数必须经过技术经济分析，要充分地考虑经济性和可靠性等因素。

2. 材料的应用与选择

燃煤发电机组的蒸汽参数由亚临界逐步提高到超超临界，其技术不断进步的重要原因在于新型电站用钢材料的不断研发与成熟。材料科学技术的不断发展，是工业技术进步的基础与保障，因此，在开始进行新一代技术研发时，应先行开展材料的研发工作。

在选材方面，超超临界机组的选材要保证所有部件在机组的最高蒸汽参数和最大压力下能安全、可靠、稳定、有效地工作；不仅要重视高温部件的选材，还应注意，由于初参数的提高，其他部件的工作条件也发生了变化，也要注意非高温部件材料的选择。对于超超临界机组而言，蒸汽参数的提高，将涉及锅炉和汽轮机高、中压部分有关部件，如高压蒸汽管道和集箱、高温过热器/再热器管和水冷壁管、汽缸、主调节阀阀壳、再热主调节阀阀壳、喷嘴、转子及调节级叶片等部件的材料，必须按温度和压力选择相应的材料，进行相应的强度设计。近年来国外大量超超临界机组成功的材料应用经验证明，低铬耐热钢和新高温铁素体——马氏体 9%~12%Cr 材料已经可以用于压力为 31MPa、温度为 610℃/625℃参数等级的机组。经过锅炉和汽轮机各高温高压部件多年的应用，该材料系列已相当成熟，并已列入标准。此外，包括 18Cr-8Ni 系（如在 SA-213 TP304H、SA-213 TP347H 基础上发展的 TP347HFG、Super304H、Tempaloy A-1 等），20-25Cr 系（如 HR3C、NF709、TempaloyA-3）等一些新型奥氏体耐热钢材料的使用壁温达 650~750℃，亦成功应用于超超临界机组。

3. 机组容量选择

日本从 20 世纪 90 年代以后投产的超临界和超超临界机组多在 600MW 以上，以 1000MW 等级的机组居多。欧洲的超超临界机组容量则更多为 700MW 以上。

4. 再热形式选择

超超临界机组一般采用一次再热循环方式。丹麦的两台热电联供 415MW 的超超临界机组，采用二次再热的循环方式，机组参数为 29MPa/582℃/580℃/580℃、28.5MPa/580℃/580℃/580℃。日本川越电站的两台 700MW 超超临界机组，也采用二次再热循环方式，其机组参数为 31MPa/566℃/566℃/566℃。在上述机组参数下，二次再热将使机组造价增加 10%~15%，而经济性得益为 1.3%~1.5% 左右。随着材料技术的不断完善，后来出现的机组多为提高蒸汽参数，采用一次再热循环。从超超临界发电技术发展趋势来看，压力 30MPa 以下机组将更多采用一次再热，以降低系统复杂程度、提高可靠性。随着参数的进一步提高，二次再热将成为再热系统形式的选择方案之一。

国外主要发达国家早期投运的机组为超临界和超超临界机组并存，但近期欧洲和日本新投运的机组都是超超临界机组，主蒸汽温度普遍达到 600℃，主蒸汽压力均不大于 27.5MPa，机组容量为 700MW 和 1000MW 等级，并且机组参数朝着更高的方向发展。未来的发展趋势是研究和示范先进超超临界发电技术，主蒸汽温度达到 700℃ 及以上，主蒸汽压力达到 35MPa，使用镍基高温材料。

700℃ 等级超超临界燃煤发电技术能够大幅提高机组的发电效率、降低污染物及 CO₂ 等温室气体的排放。美国、日本、欧洲等国家和地区已开展了该领域的研究和示范工作，并制订了建设示范电站的计划。目前，国家能源局和科技部分别启动了 700℃ 等级超超临界燃煤发电技术的产业科技技术项目，与国际同步开始 700℃ 等级超超临界燃煤发电技术的研究。

第二节 我国超超临界燃煤发电技术的发展和现状

我国煤炭资源丰富,2000m 以内的预测煤炭资源量为 5.6 万亿 t,能源剩余可采总储量中的原煤占 58.8%,决定了我国以煤炭为主的能源利用格局将长期存在,也决定了燃煤发电在我国具有较好的供应安全性和经济性,以燃煤发电为基础的电力格局在相当长的一段时间内不会有大的改变。根据对电力工业“十二五”规划的相关研究预测,到 2015 年全国电力装机容量将达到 14 亿 kW 左右,其中煤电 9.33 亿 kW,占比 66%左右。到 2020 年,全国发电装机容量有望达到 18 亿 kW 左右,其中煤电 12 亿 kW,继续占比 2/3 左右。

一、我国电力工业的特点

(一) 我国电力工业的状况和存在的主要问题

我国电煤消费量约为煤炭消费总量的一半左右,但我国煤炭分布不均衡,与经济发展呈逆向格局,结构性矛盾突出。在已探明的所有储量中,华北和西北地区煤炭资源所占比例高,山西、内蒙古、陕西和新疆四省区就集中了全国近 76%的煤炭储量。而经济发达的地区,煤炭产量极为有限。为保障经济发展,我国在东部和中部地区布局了大量的燃煤发电机组,形成西煤东送、北煤南运的格局。这种格局不仅增加了煤炭的运输成本,还因为长距离运输使得运输中的煤炭损耗增加。

2009 年,我国提出 2020 年非化石能源在一次能源消费中的比重要达到 15%,单位 GDP CO₂ 排放量比 2005 年下降 40%~45%的目标。对电力工业提出的任务是,在燃煤发电趋势不会转变的前提下,优化煤电的发展,向集约化、环保化方式转变。

今后我国电力工业主要发展方式有:①推行煤电一体化开发,优化综合能源运输体系。贯彻落实国家西部大开发战略,加快在山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆等煤炭资源丰富地区布局建设大容量、高效率的燃煤发电机组,建成一批大型燃煤电站集群,形成若干个大型煤电基地。坚持输煤输电并举,利用特高压输电网架向东中部地区供应电力。②推行煤电清洁开发,全面应用洁净煤发电技术。西部和北部地区主要布局建设低污染、节水的燃煤发电机组。合理控制东部地区煤电装机规模,在东中部电力受端地区适量布局建设起负荷支撑作用的大容量、高效率、低污染的洁净煤发电机组。

这样的发展方式有几个主要好处:①在西部地区建设一批高效、节水、低污染的煤电一体化基地,可以实现煤炭就地规模化利用,减少了煤炭外运量,在保护当地生态与环境的同时,提高了全国整体煤炭利用效率,形成集约化发展。②“西电东送”可以大幅降低“西煤东送”给全国带来的运输压力、生态破坏与环境污染,优化了综合能源运输体系,带动全国能源供应体系向环保化发展。③在东中部地区建设洁净煤发电机组,既满足了当地基本电力需求、保证电网安全稳定运行,又减少了东中部地区的生态破坏和环境污染,形成可持续发展。实现上述发展方式转变的关键在于快速研发并产业化推广大容量、高效率、低污染的洁净煤发电技术。

(二) 我国超超临界发电技术的应用前景

电力行业是装备型行业,电力行业技术水平的提升必须与电站装备制造行业技术进步携手共进。2000 年,我国电网主力机组为 300MW 亚临界机组,国产 600MW 超临界机组尚未开工,国际上也仅有少量超超临界机组刚投入运行。面对我国电力行业快速发展、急需更高效燃煤发电机组的迫切需求,原国家电力公司以“开发可供电力行业升级换代用的清洁高

效大型燃煤发电设备”为攻关目标，启动了“超超临界燃煤发电技术”的前期论证与研究工作。2002年，科技部将“超超临界燃煤发电技术”列入“十五”国家863计划重点项目，正式启动了超超临界燃煤发电技术的研发与应用推广工作。

根据“超超临界燃煤发电技术”的课题1“超超临界机组的技术选型研究”的选型结果，2004年国家发展改革委明确要求在缺乏煤炭资源的东部沿海地区，优先规划建设发电煤耗不高于275g/kWh的燃煤电站。

加快建设和发展超超临界燃煤发电机组是解决电力短缺、能源利用率低和环境污染严重的最现实、最有效的途径。目前，超超临界燃煤发电机组已成为我国电力工业新增装机的主力机组。超超临界燃煤发电技术的发展带动了制造工业、材料工业、环保工业及其他相关产业的发展，是电力工业可持续发展的战略选择。

二、我国超超临界燃煤发电技术的研发

(一) 自主研发

“超超临界燃煤发电技术”研究项目围绕我国开展超超临界机组的应用技术问题进行专题研究，分为5个课题：课题1“超超临界机组的技术选型研究”；课题2“超超临界锅炉关键技术研究”；课题3“超超临界汽轮机关键技术研究”；课题4“大型燃煤电站烟气净化技术研究”；课题5“超超临界机组电站设计与运行技术研究”。项目首先提出了我国发展超超临界机组的技术选型方案，将现代超超临界机组设计技术、高温材料技术、加工工艺技术及热工理论等先进技术与理论相集成，形成了具有我国自己特色的3种不同类型的1000MW超超临界锅炉和汽轮机的设计开发、制造软件包研制和材料加工性能研究；在系统分析当时已有燃煤发电厂设计规程规范对超超临界电站的适应性的基础上，自主设计了超超临界机组电站；在分析研究超超临界机组运行特性的基础上，有针对性地制定了超超临界机组的启动调试规程，自主调试了1000MW和600MW机组；开发出配套大机组的选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝装置。具体的研发内容及取得成果如下：

(1) 课题1“超超临界机组的技术选型研究”。在全面、深入地调研了国际上超超临界燃煤机组的现状和技术发展趋势的基础上，分析研究了在我国发展超超临界机组需要解决的关键问题，针对我国电站用钢的供给情况及超超临界机组用钢的需求，在立足于通过国际市场采购已商业化的耐热金属材料的前提下，分析研究了现阶段在我国建设超超临界机组需要确定的机组参数、容量、结构型式、热力系统、重要辅机配套、机炉参数匹配及机组运行性能等问题。明确提出了我国近期发展超超临界机组的技术选型结论：主蒸汽压力25~28MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度600℃/600℃；机组容量1000MW等级和600MW等级；采用一次中间再热，并配套建设脱硫脱硝装置。研究结论既考虑了当时国际上超超临界机组技术发展的水平，又充分考虑了我国设计和制造企业通过与国外合作迅速实现本地化的可能性。

(2) 课题2“超超临界锅炉关键技术研究”。在超超临界锅炉总体设计技术研究、水动力与传热特性研究及超超临界锅炉耐热新钢种的应用研究等方面取得了一批研究成果。完成了1000MW超超临界塔式布置螺旋管圈锅炉、II型布置螺旋管圈锅炉及II型布置垂直管圈锅炉三种典型锅炉的设计方案；通过对超超临界锅炉水动力计算、传热和启动特性等共性问题的研究，开发出能够用于具有不同炉型与管圈类型的超超临界锅炉启动特性计算程序。通过对超超临界锅炉新型耐热钢应用研究，获得了新型耐热钢原材料和焊接接头常温和高温性能的量化结果，掌握了新型耐热钢的微观组织结构特征和强化机理。通过工艺研究，掌握了

新型耐热钢的工艺特性，制定了既符合国情又行之有效的相关工艺。自主开发的超超临界锅炉热力性能计算程序和适用于具有不同炉型（塔式、 Π 型布置）与管圈类型（螺旋管圈、垂直管圈）的超超临界锅炉启动特性计算程序，已经过工程验证和考核，并应用于浙江玉环电厂 1000MW 超超临界锅炉启动特性计算分析。

本书中的超超临界燃煤锅炉技术的内容，是以哈尔滨锅炉厂有限责任公司（以下简称哈尔滨锅炉厂）、东方锅炉（集团）股份有限公司（以下简称东方锅炉厂）、上海锅炉厂有限公司（以下简称上海锅炉厂）在课题 2“超超临界锅炉关键技术研究”中的研究内容为参考，总结了近年来三大电站锅炉制造企业在超超临界锅炉性能设计、金属材料选用和先进制造工艺、自动控制及运行调整等方面的技术发展。本书中涉及的“1000MW 塔式布置螺旋管圈超超临界锅炉”“1000MW Π 型布置螺旋管圈超超临界锅炉”“1000MW Π 型布置垂直管圈超超临界锅炉”三个目标炉型，代表了当今超超临界燃煤锅炉的技术路线。

(3) 课题 3“超超临界汽轮机关键技术研究”。在超超临界汽轮机关键设计技术研究，高温主要部件材料的理化、铸造、锻造、热处理及热加工工艺研究和高温主要部件材料的冷加工工艺研究等方面取得了一批研究成果，形成了 1000MW 超超临界汽轮机关键技术的设计、制造软件包，具备了国产 1000MW 超超临界汽轮机母型机的开发设计能力，母型机的技术指标为：蒸汽温度 $600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 左右，蒸汽压力 25~26MPa，容量为 1000MW，发电净效率达到 43%~45%，整机设备可用率大于 90%，机组型式为一次中间再热、单轴、四缸、四排汽、凝汽式。开发设计了 1200mm 长末级钢叶片，开发出了汽流激振力的分析计算程序和考虑了汽流激振力的轴系稳定性分析程序，提出了高温、高压主要部件的热分析和分类考核方法、转子冷却技术、防固体颗粒侵蚀技术等。研究了用于高温部件的改良 12Cr、新 12Cr、超纯净 NiCrMoV 低压转子材料钢种、高温、高压螺栓用 GH4169、高温汽封用弹簧片 Inconel X-750、Inconel-718 材料，并对上述材料进行了制造工艺研究。在所开发的 1000MW 超超临界汽轮机母型机的基础上，国内三大汽轮机制造商也各自根据自己产品发展的特点，相继开发出了 1000MW 超超临界汽轮机产品，并在市场上拿到了机组定单。其他关键技术研究成果，如汽轮机总体可靠性研究、防汽流激振研究、转子冷却技术、防固体颗粒侵蚀机理研究、高温汽封用弹簧片研究等，已经分别应用于浙江玉环和江苏泰州 1000MW 超超临界机组等实际工程中。

本书中的超超临界汽轮机技术的内容，是以东方汽轮机有限公司（以下简称东方汽轮机厂）、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司（以下简称哈尔滨汽轮机厂）、上海汽轮机有限责任公司（以下简称上海汽轮机厂）在课题 3“超超临界汽轮机关键技术研究”中的研究内容为参考，总结了近年来三大汽轮机制造企业在超超临界汽轮机设计技术、末级叶片及通流技术、材料、热加工和冷加工工艺等方面的技术发展。

(4) 课题 4“大型燃煤电站烟气净化技术研究”。瞄准国际烟气脱硝技术发展方向，根据我国具体情况，研究了选择性催化还原法（SCR）烟气脱硝技术，建立了小型机理、中间试验和脱硝塔系统三个试验装置并开展试验。形成了自主知识产权的脱硝系统设计技术，完成了高井电厂 100MW 燃煤发电机组烟气脱硝装置的工程设计，完成了 600MW 超临界燃煤发电机组烟气脱硝装置的工程方案设计，并合作完成了 600MW 超超临界燃煤发电机组 SCR/SNCR 混合烟气脱硝系统的工程设计。

(5) 课题 5“超超临界机组电站设计与运行技术研究”。在超超临界机组电站设计与运