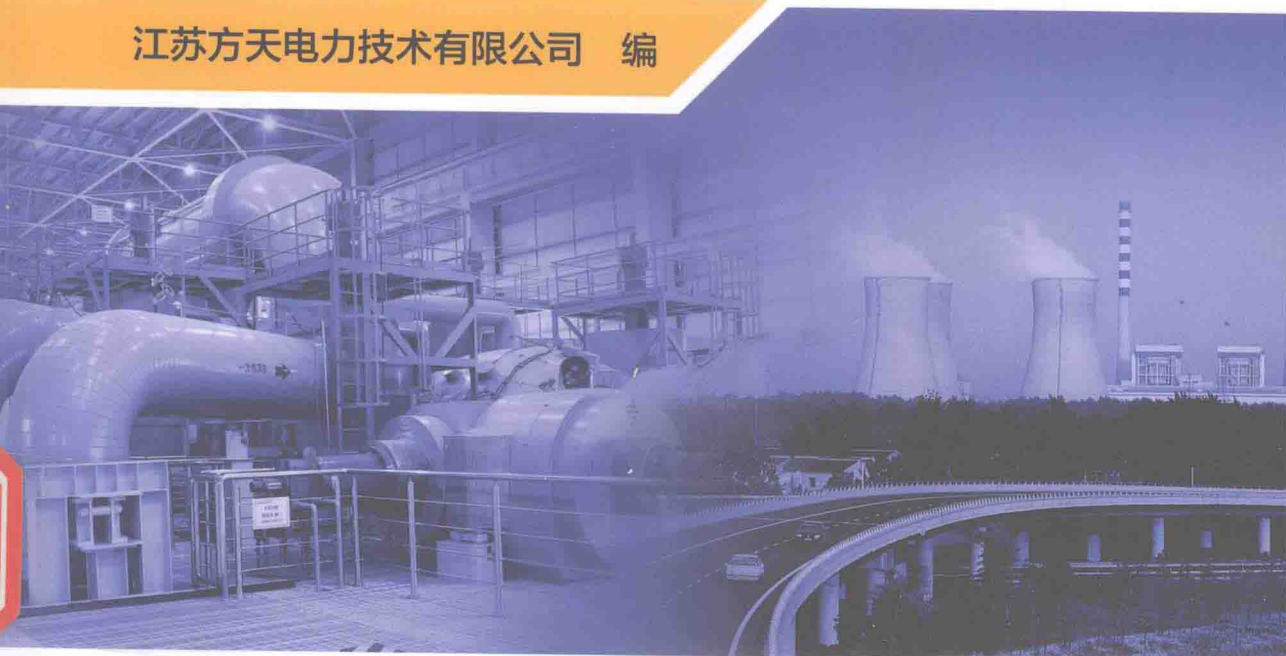


1000MW

超超临界机组调试技术丛书 汽轮机

江苏方天电力技术有限公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

1000MW

超超临界机组调试技术丛书

汽轮机

江苏方天电力技术有限公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《1000MW 超超临界机组调试技术丛书》是一套全面介绍我国目前发电机组调试和运行技术的著作,由江苏方天电力技术有限公司长期从事电源基建调试和技术服务的专家和技术人员,根据多台 1000MW 机组的调试经验汇集精心编撰而成。

《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 汽轮机》书中简明扼要地介绍了超(超)临界和汽轮机的基础知识;以百万级机组为例,详细介绍了汽轮机的结构及旁路的配置原则;分部试运时各系统的调试内容、方法及典型故障分析;整套启动试运期间的工作内容及相关试验的介绍,典型案例的分析和处理;汽轮机的性能试验内容和常规试验方法及数据处理。另外,对上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂三大主机的差异之处进行了介绍,对分部试运各系统及设备经常发生的故障进行分析和说明,以及整套启动期间各机型的典型案例等内容进行了举例分析。

本书可供从事超(超)临界汽轮机组调试、运行、维修的工程技术人员及管理人员学习阅读,为同类型机组的汽轮机设备及系统的调试、运行、维修提供借鉴及参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机/江苏方天电力技术有限公司编. —北京:中国电力出版社, 2016. 10

(1000MW 超超临界机组调试技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8678-5

I. ①汽… II. ①江… III. ①超临界机组-火电厂-蒸汽透平 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 092088 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 32.75 印张 799 千字

印数 0001—2000 册 定价 118.00 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

编 委 会

主 任 陈 晟

副主任 水为涟 许焕清 吉 宏 孔珍宝 李为中 彭祖辉 张红光
徐建军 翟学锋 陈建康 张绍宾

委 员 (按姓氏拼音排序)

丁建良 范立新 高 远 高绥强 管诗骅 华 伟 黄 磊
蒋一泉 李 军 李夕强 鲁松林 帅云峰 孙 虹 孙和泰
孙栓柱 王成亮 徐 钢 张恩先

编写组 (按姓氏拼音排序)

蔡 亮 陈 煦 陈建明 陈有福 储海军 单 华 丁 超
丁建良 丁卫华 杜先波 范立新 封建宝 傅高健 高 远
高爱民 高绥强 顾 文 管诗骅 胡 鹏 胡尊民 华 伟
黄烜城 黄治军 贾 涛 姜思洋 蒋 琛 蒋一泉 李 玮
李辰龙 李国奇 刘红兴 刘晓峰 刘亚南 卢承斌 卢修连
马新立 彭 辉 祁建民 钱庆生 殳建军 帅云峰 孙 虹
唐一铭 陶 谦 王 骏 王成亮 王卫群 王亚欧 吴建标
吴正勇 肖 杰 徐 钢 徐仕先 徐颂梅 徐泳森 许 健
许亦然 薛江涛 闫 涛 杨 春 杨宏宇 姚永灵 于国强
于海全 喻 建 袁 超 岳峻峰 张 磊 张 强 张恩先
张劲松 张泰岩 张卫庆 张耀华 张友卫 邹 磊



序

电力是现代化的基础和动力，是最重要的二次能源。电力的安全生产和供应事关我国现代化建设全局。近年来，大容量、高参数燃煤发电技术日益得到国家的重视。2014 年国务院发布《能源发展战略行动计划（2014～2020 年）》，明确将“高参数节能环保燃煤发电”作为 20 个能源重点创新方向之一。2016 年是“十三五”规划的开局之年，国家能源局发布了《2016 年能源工作指导意见》，在“推进能源科技创新”中明确了“超超临界机组二次再热、大容量超超临界循环流化床锅炉”的示范应用。2016 年发布的《十三五规划纲要》中，在“能源关键技术装备”里提出“700℃超超临界燃煤发电”等技术的研发应用。因此，在今后一段时间内发展超超临界发电技术将会是我国燃煤发电的主旋律。

近年来，高参数、大容量超超临界燃煤发电技术作为一项先进、高效、洁净的发电技术，在我国得到广泛推广与应用。2006 年 11 月，华能玉环发电厂 1000MW 超超临界燃煤发电机组的投产，标志着我国发展超超临界火力发电机组正式扬帆起航，2015 年 9 月，中国国电集团公司泰州电厂世界首台超超临界二次再热燃煤机组的顺利投产，标志着我国超超临界火力发电技术的发展进入了一个崭新的阶段。

发电机组的调试是全面检验主机及其配套系统的设备制造、设计、施工、调试和生产准备的重要环节，是保证机组能安全、可靠、经济、文明地投入生产，形成生产能力，发挥投资效益的关键性程序。在电力技术发展的长河中，我国培养了一批专业门类齐全、技术精湛、科技研发能力强、乐于奉献的调试专业队伍。他们努力钻研国内外电力工程调试前沿新技术，在长期调试工作中积累了丰富的调试经验，为我国电力技术发展作出了巨大贡献。

江苏方天电力技术有限公司在国内较早开展 1000MW 超超临界火电机组整体调试，迄今为止已顺利实施了 16 台 1000MW 机组的调试工作，并于 2015 年圆满完成了世界首台 1000MW 超超临界二次再热燃煤机组的调试，积累了较为丰富的技术经验，也得到了业界的一致好评。秉承解惑育人传承创新、共襄电力事业盛举的良好愿望，为了让火电行业技术人员和生产人员更快更好地了解和掌握超超临界火电机组的结构、系统、调试和运行等知识，江苏方天电力技术有限公司组织长期从事电源基建调试和技术服务的专家及技术人员编写了这套《1000MW 超超临界机组调试技术丛书》。本丛书包括《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 锅炉》、《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 汽轮机》、《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 热控》、《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 电气》、《1000MW

超超临界机组调试技术丛书 化学》、《1000MW 超超临界机组调试技术丛书 环保》六个分册,涵盖了 1000MW 超超临界机组主辅机、热控、电气、化学及环保等方方面面的调试知识。

本书兼顾 1000MW 超超临界火电机组的基础知识和工程实践,是一套实用的工程技术类图书。本书是从事 1000MW 超超临界火电机组工程设计、安装、调试、运行、维护的技术人员及生产人员使用的重要参考文献,是 1000MW 超超临界火电机组专业上岗培训、在岗培训、转岗培训、技术鉴定和技术教育等方面的理想培训教材,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

编者

2016 年 5 月

前言

自 20 世纪 80 年代以来,我国电力工业得到了飞速的发展,发电机组的单机容量已经达到 1000MW,机组参数也由亚临界提高到超(超)临界。目前我国已经是世界上拥有超(超)临界机组最多的国家,600MW 及以上超(超)临界机组已经成为我国火力发电的主力机组,超(超)临界机组的安全、经济、稳定运行对国民经济的发展有着重要的意义。

随着超(超)临界火电机组的成功运行,我国取得了一些重要的调试和运行经验。近几年来,国内在汽轮机设备设计、制造、调试、运行方面的技术、经验、能力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(超)临界汽轮机组的发展提供了必要的条件和基础。

(超)超临界机组调试过程中能否安全、经济、稳定运行,对机组投入商业运行后的状态起着至关重要的决定性作用。汽轮机设备及系统从单体调试开始就必须执行完善、严谨的调试工作程序,分系统调试及整套启动调试工作更要秉持“精细化”调试工作思路,这对提高超(超)临界汽轮机组投运水平,提高汽轮机组运行稳定性、经济性具有事半功倍的效果。

为了提高超(超)临界汽轮机组的调试和运行技术水平,我们组织了一批长期从事电源基建调试和技术服务的专家及技术人员,立足工程建设实际,总结超(超)临界 1000MW 汽轮机组调试工程中的经验与案例,编写了《1000MW 超超临界机组调试技术 汽轮机》。本书对指导今后超(超)临界汽轮机组的调试、运行工作和提升现场调试、运行人员的综合素质和技术水平,具有很大的好处。

本书共分五篇、三十六章,第一章至第四章由高远、卢承斌、管诗骈编写;第五章至第九章由王骏、张耀华、丁超、戴兴干编写;第十章至第二十四章由薛江涛、吴建标、许健、何利鹏、李曦阳、马运翔编写;第二十五章至第三十章由彭辉、卢修连、刘晓峰、何小锋编写;第三十一章至第三十六章由姚永灵、吴正勇、张泰岩、徐斌编写。全书由高远、丁建良统稿。

本书在编写过程中,参阅了书中所列的参考文献以及相关电厂、制造厂、设计院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和帮助;中国电力出版社编辑不辞辛劳,多次指导编审工作,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平所限,时间仓促,谬误欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2016 年 9 月



目 录

序
前言

第一篇 超超临界和汽轮机的基础知识	1
第一章 超超临界的概念	1
第一节 概述	1
第二节 超超临界热力学概念	3
第三节 超超临界经济可行性	7
第二章 汽轮机的分类和型号	9
第一节 汽轮机的分类	10
第二节 汽轮机型号表示方法	11
第三章 火电厂热力循环的基本知识	13
第一节 卡诺循环和朗肯循环	13
第二节 提高火电厂的热力循环热经济性的途径	14
第三节 原则性热力系统	15
第四节 全面性热力系统	18
第四章 汽轮机基本知识	19
第一节 蒸汽动力循环	19
第二节 汽轮机做功过程	20
第三节 汽轮机的组成	21
第二篇 1000MW 超超临界汽轮机主要机型特点比较分析及旁路选型	26
第五章 哈尔滨汽轮机厂 1000MW 超超临界汽轮机	26
第一节 概述	26
第二节 主要技术规范	26
第三节 技术特点	27
第四节 汽轮机的运行方式和启动系统	41
第六章 上海汽轮机厂 1000MW 超超临界汽轮机	42
第一节 概述	42
第二节 主要技术规范	42
第三节 技术特点	43

第四节 启动技术特点	66
第七章 东方汽轮机厂 1000MW 超超临界汽轮机	69
第一节 概述	69
第二节 主要技术规范	70
第三节 技术特点	71
第四节 启动技术特点	90
第八章 设备参数及运行经济型比较分析	91
第一节 主要机型参数比较	91
第二节 主机运行特性比较	99
第三节 超超临界机组热力参数优化及其对热效率的影响	102
第四节 我国超超临界机组运行经济性分析	109
第五节 国产 1000MW 机组产品经济性比较	112
第九章 1000MW 超超临界汽轮机旁路系统	122
第一节 主要作用	122
第二节 旁路系统型式	126
第三节 旁路系统选型考虑的主要因素	128
第四节 旁路系统容量的选择	131
第五节 旁路的合理配置需注意的问题	132
第六节 国内外超超临界 1000MW 机组典型旁路系统	133
第七节 旁路控制系统的组成及作用	136
第八节 旁路系统构成	140
第九节 旁路系统的运行	144
第三篇 1000MW 汽轮发电机分部试运	149
第十章 分部试运	149
第一节 分部试运的概念和内容	149
第二节 分部试运工作准备	151
第三节 分部试运工作内容	153
第十一章 抽汽回热系统	161
第一节 加热器的主要类型和原理	161
第二节 主要设备结构及运行特点	165
第三节 系统调试	174
第四节 常见问题及处理	176
第十二章 真空系统及其设备	180
第一节 工作原理和结构	180
第二节 抽真空系统	187
第三节 系统调试	192
第四节 调试过程常见问题及处理	194
第十三章 凝结水系统及其设备	197

第一节	工作原理及系统介绍·····	197
第二节	主要设备结构及运行特点·····	198
第三节	系统调试·····	208
第四节	常见问题及处理·····	210
第十四章	给水系统及其设备·····	213
第一节	工作原理及系统介绍·····	213
第二节	主要设备结构和运行特点·····	214
第三节	系统调试·····	225
第四节	常见问题及处理·····	229
第十五章	循环水系统及其设备·····	233
第一节	工作原理及系统介绍·····	233
第二节	主要设备结构及运行特点·····	234
第三节	系统调试·····	240
第四节	常见问题及处理·····	242
第十六章	驱动给水泵汽轮机及其系统·····	245
第一节	结构及系统·····	245
第二节	润滑油系统·····	258
第三节	调节保安系统·····	262
第四节	系统调试·····	267
第五节	常见问题及处理·····	272
第十七章	开式冷却水系统·····	276
第一节	工作原理及系统介绍·····	276
第二节	主要设备结构及运行特点·····	278
第三节	系统调试·····	281
第四节	常见问题及处理·····	282
第十八章	辅助蒸汽系统·····	284
第一节	工作原理及系统介绍·····	284
第二节	主要设备及运行特性·····	284
第三节	系统的调试·····	286
第四节	常见问题及处理·····	289
第十九章	闭冷水系统·····	290
第一节	工作原理及系统介绍·····	290
第二节	主要设备运行特点·····	291
第三节	系统调试·····	293
第四节	常见问题及处理·····	296
第二十章	主机润滑油系统·····	300
第一节	工作原理及系统介绍·····	300
第二节	主要设备结构及运行特点·····	301
第三节	系统调试·····	312

第四节 常见问题及处理·····	318
第二十一章 EH 油系统 ·····	325
第一节 工作原理及系统介绍·····	325
第二节 主要设备结构、运行特点·····	326
第三节 系统的调试·····	329
第四节 常见问题及处理·····	332
第二十二章 氢冷系统 ·····	334
第一节 工作原理及系统介绍·····	334
第二节 主要设备·····	335
第三节 系统调试·····	337
第四节 常见问题及处理·····	341
第二十三章 密封油系统 ·····	343
第一节 工作原理及系统介绍·····	343
第二节 主要设备结构及运行特点·····	346
第三节 系统调试·····	353
第四节 常见问题及处理·····	355
第二十四章 定子冷却水系统 ·····	359
第一节 工作原理及系统介绍·····	359
第二节 主要设备结构及运行特点·····	360
第三节 系统调试·····	362
第四节 常见问题及处理·····	365
第四篇 汽轮机整套启动 ·····	369
第二十五章 整套启动的条件 ·····	370
第一节 试运现场必须具备的基本条件·····	370
第二节 设备及系统应具备的技术条件·····	371
第三节 启动前辅助系统的投运·····	371
第四节 启动对汽水品质的要求·····	373
第二十六章 整套启动工作内容 ·····	375
第一节 冲转前的汽轮机检查·····	375
第二节 汽轮机冲转参数的选择·····	375
第三节 空负荷试运阶段的调试工作·····	378
第四节 带负荷试运阶段的调试工作·····	381
第五节 满负荷阶段的工作·····	382
第六节 汽轮机停机·····	384
第二十七章 典型机组启动过程 ·····	386
第一节 上汽西门子机组的启动·····	386
第二节 哈汽东芝机组的启动·····	400
第三节 东汽日立机组的启动·····	409

第二十八章 整套试运中的专项试验	414
第一节 汽轮机振动测量与分析	414
第二节 汽轮机组甩负荷试验	440
第二十九章 整套试运中反事故预案	450
第一节 机组调试重大事故风险分析的基本要求	450
第二节 汽轮机启动的安全原则	450
第三节 防止汽轮机超速	451
第四节 防止汽轮机轴系断裂	452
第五节 防止汽轮机大轴弯曲	453
第六节 防止汽轮机油系统故障	455
第七节 汽轮机进水	458
第三十章 汽轮机整套试运中常见问题分析	460
第一节 上汽西门子机组问题	460
第二节 首台哈汽东芝机组启动调试问题	466
第五篇 汽轮机性能试验	470
第三十一章 概述	470
第三十二章 试验方法	471
第一节 试验的策划和设计	471
第二节 试验的技术要点	474
第三节 试验的实施	480
第三十三章 测量仪表及测量方法	484
第一节 测点布置	484
第二节 压力测量	486
第三节 温度测量	488
第四节 流量测量	489
第五节 电功率测量	491
第六节 其他测量	493
第三十四章 试验结果的计算及修正方法	494
第一节 试验结果的计算	494
第二节 试验结果的修正方法	499
第三十五章 达标投产试验	504
第一节 机组热耗试验	505
第二节 汽轮机出力试验	506
第三节 机组供电煤耗试验	506
第三十六章 试验结果的不确定度评定	507
参考文献	509



第一篇 超超临界和汽轮机的基础知识

第一章 超超临界的概念

第一节 概 述

当前,世界能源消费结构中,化石燃料占 88%以上,水电、核电和可再生能源等不排放 CO₂的能源只占很小的比例。按照国际能源署(IEA) 2006 年的预测,到 2030 年,化石燃料仍然占世界能源消费的 75%以上。由于人类活动特别是化石燃料的大量使用,工业化以来,全球 CO₂的平均浓度已从 1750 年(工业化前)的 $280 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 上升到 2009 年的 $387.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ [美国国家海洋和大气管理局(NOAA)数据],表 1-1 列举了 1959 年至 2009 年全球二氧化碳平均浓度。世界气象组织(WMO)于 2014 年 4 月发布一份关于温室气体 CO₂浓度的数据,该数据显示,包括日本、夏威夷、美国、德国在内的北半球 12 个观测点,检测出的 CO₂浓度值均超过 $400 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

表 1-1 1959~2009 年全球二氧化碳平均浓度

年份	全球 CO ₂ 平均浓度	年份	全球 CO ₂ 平均浓度
1959	315.98	1973	329.68
1960	316.91	1974	330.17
1961	317.64	1975	331.08
1962	318.45	1976	332.05
1963	318.99	1977	333.78
1964	319.62	1978	335.41
1965	320.04	1979	336.78
1966	321.38	1980	338.68
1967	322.16	1981	340.11
1968	323.04	1982	341.22
1969	324.62	1983	342.84
1970	325.68	1984	344.41
1971	326.32	1985	345.87
1972	327.45	1986	347.19

续表

年份	全球 CO ₂ 平均浓度	年份	全球 CO ₂ 平均浓度
1987	348.98	1999	368.14
1988	351.45	2000	169.40
1989	352.90	2001	371.07
1990	354.16	2002	373.17
1991	355.48	2003	375.78
1992	356.27	2004	377.52
1993	356.95	2005	379.76
1994	358.64	2006	381.85
1995	360.62	2007	383.71
1996	362.36	2008	385.57
1997	363.47	2009	387.35
1998	366.50		

按照目前的发展趋势，联合国气候变化专门委员会（IPCC）预测，到 2050 年，全球 CO₂ 的平均浓度为 $550\times10^{-6}\text{m}^3/\text{m}^3$ ，而到 2100 年将达到 $970\times10^{-6}\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

从全球看，为了从根本上解决气候变化问题，世界能源结构调整势在必行。从历史上看，人类进入近代工业社会以来，能源利用结构的调整共有三次：

第一次是 18 世纪下半叶英国产业革命后，由传统的柴薪能源迅速转向以煤为主的能源结构。蒸汽机的出现加速了 18 世纪开始的产业革命，促进了煤炭的大规模开采。到 19 世纪下半叶，出现了人类历史上第一次能源转换。1860 年，煤炭在世界一次能源消费结构中占 24%，1920 年上升为 62%。从此，世界进入了“煤炭时代”。

第二次是 19 世纪 70 年代，电力代替了蒸汽机，电器工业迅速发展，煤炭在世界能源消费结构中的比重逐渐下降。1965 年，石油首次取代煤炭占居首位，世界进入了“石油时代”。1979 年，世界能源消费结构的比重是：石油占 54%，天然气和煤炭各占 18%，油气之和高达 72%。石油取代煤炭完成了能源的第二次转换。

第三次是现在，由于化石燃料储量有限和环境的压力日益增大，人类必须进行第三次能源结构的调整，转向建立以可再生能源等新能源为主体的持久能源结构体系。但无论世界还是中国，从根本上将能源结构调整到基本上不排放 CO₂ 的新能源为主体绝非短时间可以做到的，就电力工业而言，取消化石燃料的电源结构更是遥远将来的事情。

就火力发电而言，高效率就是低排放，最大限度地提高发电效率，充分发展超超临界技术是当前火电行业实现 CO₂ 减排最现实、有效和成熟的技术。

一般情况下，超临界压力机组比亚临界机组热效率高出 2%~2.5%，超超临界压力（带二次再热）机组则比超临界压力机组热效率高出 3%~5%，表 1-2 给出了超临界/超超临界机组不同蒸汽参数下所对应的供电效率。因此，从 20 世纪 80 年代开始，当超临界机组已在前苏联和西方先进工业国家普遍投入使用并成熟后，日本、欧洲等先进工业国家为进一步提高机组效率，降低污染物排放，提出了超超临界机组概念。

表 1-2 不同蒸汽参数下供电效率

机组类型	蒸汽参数	再热	给水温度	供电效率
亚临界	17MPa/540℃/540℃	1	275℃	35%
超临界	24MPa/538℃/566℃	1	275℃	40%
超超临界	25MPa/600℃/600℃	1	275℃	45%
超超临界	35MPa/700℃/700℃	1	275℃	48.5%
超超临界	30MPa/600℃/600℃/600℃	2	310℃	51%
超超临界	35MPa/700℃/720℃/720℃	2	320℃	52.5%
超超临界	37.5MPa/700℃/720℃/720℃	2	335℃	53%

超超临界机组作为有效利用能源的一项新技术。具有工质参数高、机组效率高、环境污染小和可靠性高等特点。常规亚临界锅炉的典型参数为 18.2MPa/540℃/540℃，机组发电效率为 38%~39%。当锅炉主蒸汽参数超过水临界状态点的参数，即压力为 22.129MPa、温度为 374.15℃，统称为超临界机组。在 20 世纪 70~80 年代，一般超临界锅炉的典型参数为 25.4MPa/543℃/541℃或 25.4MPa/543℃/ 569℃，对应的发电效率为 41%~42%。超超临界锅炉（Ultra Supercritical Boiler）是在超临界锅炉的基础上采用更高的蒸汽压力和蒸汽温度，以进一步提高机组的热效率。在一定范围内，新蒸汽温度和再热蒸汽温度每提高 10℃，机组的热耗就可下降 0.25%~0.3%。如果增加再热次数，例如采用二次再热，在同样蒸汽参数下热耗可较采用一次再热下降，因而提高蒸汽的初参数、采用再热系统和增加再热次数都能提高循环的热效率。

各国，甚至各公司，对超超临界锅炉的定义也有所不同，例如：日本的定义为压力不小于 25.5MPa，或温度达到 593℃；丹麦定义为压力大于 28MPa；西门子公司则是从使用材料的等级来区分超临界和超超临界锅炉；我国电力百科全书则将超超临界锅炉定义为蒸汽参数高于 27.5MPa 的锅炉。目前国际上普遍认同的超超临界锅炉是指主蒸汽压力不小于 28.5MPa 或主蒸汽压力不小于 25.4MPa 且主蒸汽温度不小于 585℃的锅炉。

第二节 超超临界热力学概念

火电厂工质用的是水，常规条件下对水进行加热，当水的温度达到给定压力下的饱和温度时，将产生相变，水开始从液态变成汽态，出现一个饱和水与饱和蒸汽两相共存的区域，这时尽管加热仍在进行，但汽水两相的温度不再上升，直至液态水全部蒸发完毕，干饱和汽才继续升温，成为过热蒸汽。但当温度超过临界温度 t_c 值时，水的液相就不存在，与临界温度相对应的饱和压力称为临界压力 p_c ，临界点的压力和温度是水的液相和汽相能够平衡共存的最高值，为固有物性常数。水的临界参数为： $t_c=374.15℃$ ， $p_c=22.129MPa$ 。在临界点以及超临界状态时，将看不见蒸发现象，水在保持单相的情况下从液态直接变成汽态。一般将压力大于临界点 p_c 的范围称为超临界区，压力小于 p_c 的范围称为亚临界区。从物理意义上讲，水的物性只有超临界和亚临界之分，如前所述，超超临界和超临界只是人为的一种区分。

在通常情况下，为了把水从液态加热到汽态，一般需要有蒸发过程的汽化潜热，但是在临界点 C 以及超临界状态时，将看不见蒸发现象，水在保持单相的情况下从液态直接变成汽态。一般将压力大于临界点 p_c 状态范围称为超临界区，压力小于 p_c 的范围称为亚临界

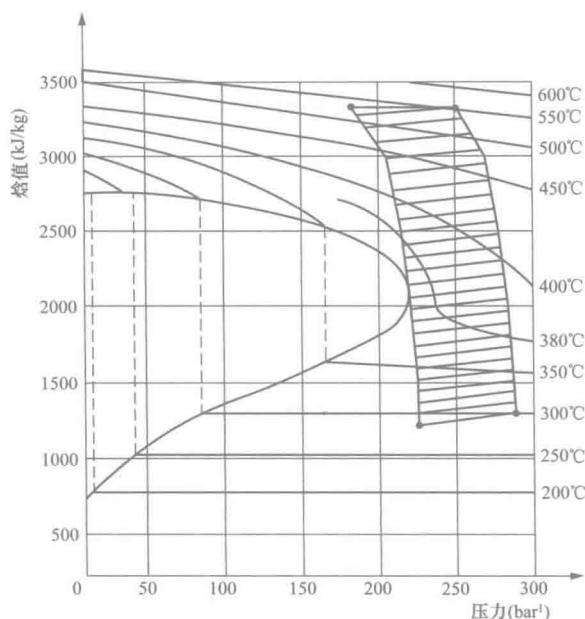


图 1-1 不同压力工质在 $h-P$ 图上的加热过程

区。从水的物性来讲，只有超临界和亚临界之分，超超临界与超临界是人为的一种区分，Ultra Supercritical (USC) 常译成超超临界，也可理解为优化的或高效的超临界参数。图 1-1 表示亚临界、超临界及超超临界状态下在 $h-P$ 图上的加热过程，图 1-2 为水在亚临界锅炉和超临界锅炉加热的相变过程示意图。

1. 温度

热力循环分析表明，对于一定容量的机组，当蒸汽初压不变提高蒸汽初温，循环效率将会提高。同时，由于新蒸汽比容增大和低压缸排汽湿度减小，汽轮机的内效率也可提高，提高蒸汽的温度对提高机组热效率更有益。蒸汽初温的提高主要受材料的许用温度限制，当初温提高到一定程度，锅炉的过热器和再

热器、汽轮机的高、中压进汽部分的材料将需要采用热强度高的奥氏体合金钢。

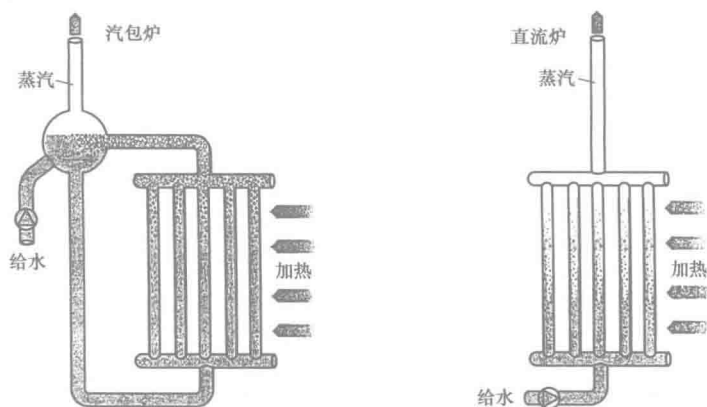


图 1-2 亚临界、超临界相变示意

关于蒸汽温度参数的选用，由于美国、日本和欧洲 600℃ 等级新型高温材料的开发成功，超超临界汽轮机的主蒸汽和再热蒸汽温度已普遍提高到 580~593℃，在 2003~2004 年投运的一些机组蒸汽温度超过了 600℃。根据分析，在一定的范围内，主蒸汽温度或再热汽温每提高 10℃，机组的热耗就可下降 0.25%~0.3%。从理论上讲，超超临界机组蒸汽参数提高，热效率也随之提高，在主蒸汽压力不变的情况下，主蒸汽和再热蒸汽温度从 538℃/566℃ 提高到 593℃/593℃，机组热效率能够改善 2%~2.5%。为了使超超临界机组降低制造成本，提高市场竞争力，开发热强性高、工艺性好，价格低廉的高温材料是最关键的问题。

1 1bar=0.1MPa

题。图 1-3 表示在一定蒸汽压力下，提高蒸汽初温对机组净效率提高的影响。

2. 压力

当新蒸汽初温不变仅提高初压时，一定范围内可提高机组热效率。但单独提高初压过大，机组热效率反而会降低，其主要原因是初压提高时蒸汽比容减小，将使汽轮机超高压通流部分叶片高度减小，甚至需要采用部分进汽，这样将使叶片级的二次流损失和轴封漏汽损失都增大，将抵消一部分提高压力参数所带来的好处。同时，低压缸的排汽湿度将随初压的提高而增加，加大湿气损失，使汽轮机的热效率下降。另外，初压过高又不采用二次再热，还将使低压缸末级叶片水蚀进入不可接受的程度。初温一定的情况下存在一个最佳初压，超过最佳初压后，机组的热耗率将趋于上升，图 1-4 表示初压与机组热耗的关系。根据分析，在相同的初温下，将主蒸汽压力从 24.1MPa 提高到 31MPa，超超临界机组热效率能够改善 1%~1.5%。

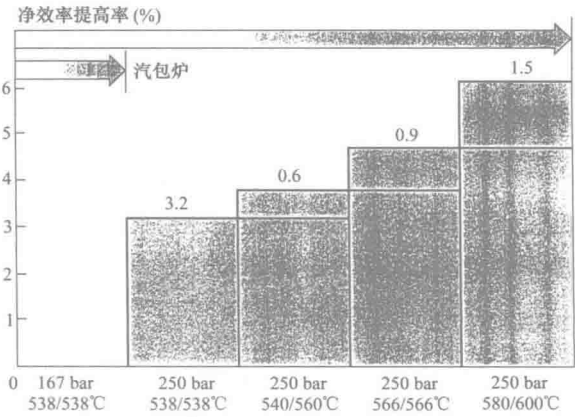


图 1-3 蒸汽初温对机组净效率提高的影响

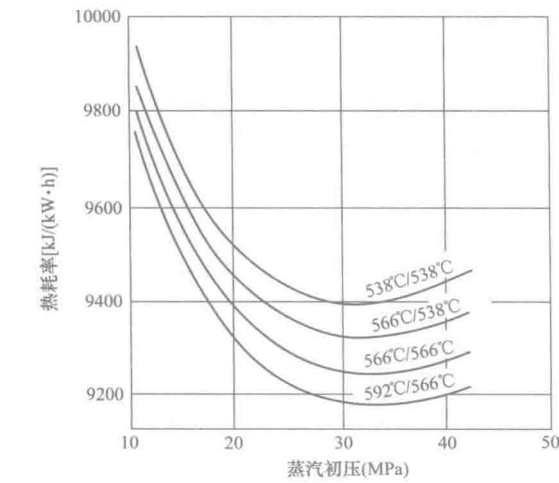


图 1-4 最佳初压与机组的热耗率关系曲线

关于超超临界机组蒸汽压力的选用，欧洲国家选取比较高，基本上在 26~30MPa 范围。日本选取比较低，除川越的两台机组选用了 31MPa 外，其他大部分机组为 24~25MPa。据分析日本制造商认为将压力参数提得过高，汽轮机的超高压部分的通流部分气动损失增加，另外还提高压力需要增大机组用材量，提高机组的制造成本，产品的市场竞争力减弱。所以，日本在 1993~2003 年投运的超超临界机组的主蒸汽压力均在 24~25MPa，也就是超临界机组的压力参数水平。

现代超超临界机组为适应调峰的需要，还要求锅炉和汽轮机能够滑压运行。当机组负荷低于 75%~80% 时，超超临界锅炉锅内

压力已处于亚临界状态。设计超超临界锅炉时，还需要同时考虑锅炉在亚临界压力状态下运行的可靠性。但从经济性考虑，超超临界机组应尽量带基本负荷运行，否则将影响其高效节能的优势发挥。

3. 再热

为了提高大容量机组的经济性，通常采用中间再热的办法提高热力循环的平均吸热温度，降低热耗。采用中间再热，还可以减小低压缸末级的排汽湿度，提高汽轮机效率和延长末级叶片寿命。目前世界上投运的超超临界机组均采用中间再热。在材料性能允许的情况下，提高再热温度对经济性有利，通常再热温度与蒸汽初温选在同一水平，在中压缸进汽压