

1000MW超超临界火电机组技术丛书

QILUNJI SHEBEI JI XITONG

汽轮机设备及系统

广东电网公司电力科学研究院 • 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

1000MW超超临界火电机组技术丛

QILUNJI SHEBEI JI XITONG

汽轮机设备及系统

广东电网公司电力科学研究院 ● 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为促进我国电源建设的快速发展,帮助广大工程技术人员、现场生产人员了解、掌握超超临界发电技术,积累超超临界机组建设、运行、管理经验,满足广大新建电厂、改扩建电厂培训、考核需要,特组织专家编写了本套《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》。

本丛书包括《汽轮机设备及系统》、《锅炉设备及系统》、《电气设备及系统》、《热工自动化》、《电厂化学》与《环境保护》六个分册。全套丛书由广东电网公司电力科学研究院组织编写。本丛书在编写过程中,内容力求反映我国超超临界1000MW 等级机组的发展状况和最新技术,重点突出1000MW 超超临界火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容。

本书为《汽轮机设备及系统》分册,全书共分十五章,主要内容有:1000MW 汽轮机本体主要部套、蒸汽系统及其设备、真空抽汽系统、凝结水系统及其设备、给水系统及其设备、驱动给水泵汽轮机及其系统、循环水系统及其设备、主机油系统、1000MW 汽轮机的调节及保安系统、发电机冷却系统和密封油系统、1000MW 汽轮机的安装、1000MW 超超临界汽轮机主要工作系统调试、汽轮机整套启动调试、1000MW 超超临界压力汽轮机运行及维护等。

本书可作为从事1000MW 等级超超临界火电机组汽轮机专业安装调试、运行维护和检修技术等岗位生产人员、工人、技术人员和管理干部工作的重要参考,是上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的理想培训教材,也可作为大专院校有关师生的参考教材。

I. ①汽… II. ①广… III. ①火电厂-蒸汽透平
IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 247230 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 39.75 印张 977 千字

印数 0001—3000 册 定价 86.00 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

《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》

编 委 会

主 任 钟 清
副 主 任 马 斌 何宏明 高新华
委 员 顾红柏 廖宏楷 阚伟民 陈世和 李 智
陈 迅 杨楚明 林清如

《汽轮机设备及系统》

编 写 人 员

主 编 田 丰
参 编 人 员 郑李坤 韩景复 邓少翔 苏雷涛 孔范太
薛东发 冯永新

1000MW

超超临界火电机组技术丛书
汽轮机设备及系统

序

电力工业是关系国民经济全局的重要基础产业，电力的发展和国民经济的整体发展息息相关。电力行业贯彻落实科学发展观，就要依靠技术进步和科技创新，满足国民经济发展及人民生活水平提高对电力的需求。

回顾我国火电建设发展历程，我们走过了一条不平凡的道路，在设计、制造、施工、调试、运行和建设管理等方面，都留下了令人难忘的篇章。这些年来，我国火电建设坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染小的可持续发展道路。从我国国情出发，从满足国民生产对电力的需求出发，发展大容量、高参数、高效率的机组，是我国电力工业发展水平跻身世界前列的重要保证，是推动经济社会发展、促进能源优化利用、提高资源利用效率的重要保证。

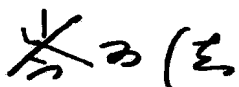
超超临界发电技术是一项先进、成熟、高效和洁净环保的发电技术，已经在许多国家得到了广泛应用，并取得了显著成效。目前，我国火电机组已进入大容量、高参数、系列化发展阶段，自主研发、开发的超超临界机组取得了可喜成绩并成为主要发展机型。因此，掌握世界一流发电技术，为筹建、在建和投运机组提供建设、管理、优化运行和检修经验，对于实现设计制造国产化、创建高水平节能环保火电厂、保证电力工业可持续健康发展，意义重大。

广东电网公司电力科学研究院是我国一所综合性的科研研究机构，一直秉承“科技兴院”的战略方针，多年来取得了丰硕的科研成果，出版过多部优秀科技著作。这次他们组织专家编写的《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》，能把他们掌握的百万机组的第一手资料和经验系统总结，有利于提高 1000MW 超超临界机组的设备制造、建设与调试、运行与管理水平，有利于促进引进技术的消化与吸收，有利于推进超超临界机组的国产化进程并为更高温度等级的先进超超临界机组

研发提供经验。而他们丰富的理论和实际经验，是完成这个任务的保证。

《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》不仅总结了国外超超临界技术的先进成果和经验，还反映了我国在这方面的研究成果和特点；不仅有理论上的论述，还有实际经验的阐述和总结。我相信，本套丛书的出版，对提高我国电力技术发展水平、积累超超临界机组的发展经验、加速发电设备的国产化、实现电源结构调整、实现能源利用率的持续提高，具有重要意义。祝本套丛书出版成功！

中国工程院院士

Handwritten signature in black ink, consisting of stylized characters that appear to be '王康' (Wang Kang).

2010年8月

1000MW

超超临界火电机组技术丛书
汽轮机设备及系统

前言

超超临界技术的发展至今已有近半个世纪的历史。经过几十年不断发展和完善,超临界和超超临界发电机组目前已经在世界上许多国家得到了广泛的商业化规模应用,并在高效、节能和环保等方面取得了显著成效。与此同时,在环保及节约能源方面的需要以及在材料技术不断发展的支持下,国际上超超临界发电技术正在向着更高参数的方向进一步发展。

进入 21 世纪以来,随着我国经济的飞速发展,电力需求急速增长,促使电力工业进入了快速发展的新时期。我国电力工业的电源建设和技术装备水平有了较大提高,大型火力发电机组有了较快增长,超临界、超超临界机组未来将成为我国各大电网的主力机组。但是,超超临界发电技术在我国尚处于刚刚起步和迅速发展阶段,在设计、制造、安装、运行维护、检修等方面的经验还不足,国内现在只有少量机组投运,运行时间也较短。根据电力需求和发展的需要,在近几年内,我国还将有许多台大容量、高参数的超超临界机组相继投入生产运行。因此,有关工程技术人员、现场生产人员对技术上的需求都很大,很需要一些有关超超临界发电技术方面的图书作为技术上的支持,并对电力生产和技术发展提供帮助和指导作用,为此,我们组织专家编写了本套《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》。

本丛书包括《汽轮机设备及系统》、《锅炉设备及系统》、《电气设备及系统》、《热工自动化》、《电厂化学》与《环境保护》六个分册。全套丛书由广东电网公司电力科学研究院组织编写。本丛书在编写过程中,内容力求反映我国超超临界 1000MW 等级机组的发展状况和最新技术,重点突出 1000MW 超超临界火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容。

本套丛书的出版,对提高我国电力装备制造水平;积累超超临界机组的建设、运行、管理经验,加速发电设备的国产化,降低机组造价;实现火电结构调整,实现能源效率的持续提高具有重要意义。

本丛书可作为从事 1000MW 等级超超临界火电机组安装调试、运行维护和检修技术等岗位生产人员、工人、技术人员和管理干部工作的重要参考,是上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的理想培训教材,也可作为大专院校有关师生的参考教材。

本书为《汽轮机设备及系统》分册,全书由田丰主编。其中,第一~三、十三

~十五章由田丰编写，第四、五、九章由韩景复编写，第六~八章由郑李坤编写，第十章由冯永新编写，第十一章由苏雷涛、薛东发编写，第十二章由邓少翔、孔范太编写，全书由田丰统稿。

本书在编写过程中，得到了很多电厂、科研院所及相关技术人员的支持和帮助，在此表示感谢。

由于编者的水平和所收集的资料有限，书中的缺点和谬误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2010年8月

1000MW

超超临界火电机组技术丛书
汽轮机设备及系统

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 汽轮机及其系统选择.....	1
第二节 1000MW 汽轮机组现状和主要技术参数	18
第二章 1000MW 汽轮机本体主要部套	34
第一节 上海—西门子型 1000MW 汽轮机.....	34
第二节 哈汽—东芝型 1000MW 汽轮机.....	98
第三节 东方—日立型 1000MW 汽轮机	133
第三章 蒸汽系统及其设备	165
第一节 主蒸汽和再热蒸汽系统.....	165
第二节 1000MW 汽轮机旁路系统	172
第三节 汽轮机抽汽及回热系统.....	194
第四节 辅助蒸汽系统.....	252
第五节 轴封蒸汽系统.....	256
第四章 真空抽汽系统	267
第一节 凝汽器工作原理及结构.....	267
第二节 抽真空系统.....	284
第三节 凝汽器胶球清洗系统.....	288
第五章 凝结水系统及其设备	292
第一节 系统概述.....	292
第二节 凝结水泵.....	295
第三节 凝结水储存水箱及凝结水输送泵.....	299
第六章 给水系统及其设备	300
第一节 系统概述.....	300
第二节 给水泵组结构及技术参数.....	303
第三节 给水泵组运行与维护.....	318

第七章 驱动给水泵汽轮机及其系统	323
第一节 驱动给水泵汽轮机结构.....	325
第二节 驱动给水泵汽轮机汽水系统.....	329
第三节 驱动给水泵汽轮机润滑油系统.....	331
第四节 驱动给水泵汽轮机抗燃油系统.....	333
第五节 驱动给水泵汽轮机调节保安系统.....	336
第六节 驱动给水泵汽轮机的启动、运行与维护.....	342
第八章 循环水系统及其设备	347
第一节 循环水供水系统及其设备.....	348
第二节 凝汽器循环冷却水系统.....	355
第三节 开式冷却水系统.....	360
第四节 闭式冷却水系统.....	362
第九章 主机油系统	366
第一节 润滑油系统.....	366
第二节 顶轴油系统.....	372
第三节 润滑油净化系统.....	374
第四节 液压油系统.....	377
第十章 1000MW 汽轮机的调节及保安系统	381
第一节 调节及保安系统的概述.....	381
第二节 DEH 的液压伺服系统	385
第三节 汽轮机的保护系统.....	407
第四节 高压供油系统.....	414
第十一章 发电机冷却系统和密封油系统	417
第一节 发电机的氢气控制系统.....	417
第二节 发电机密封油系统.....	424
第三节 发电机定子冷却水系统.....	429
第十二章 1000MW 汽轮机的安装	437
第一节 基础和设备验收.....	437
第二节 汽轮机本体安装.....	439
第三节 汽轮机本体附件安装.....	445
第四节 润滑油系统冲洗.....	446
第五节 液压油系统冲洗.....	451

第六节	蒸汽管道的吹扫	452
第七节	其他系统检查清洗	455
第十三章	1000MW 超超临界汽轮机主要工作系统调试	457
第一节	润滑油系统调试	458
第二节	主机调节保安系统调试	461
第三节	发电机冷却水、密封油和氢系统调试	463
第四节	给水泵冷却水、密封油和氢系统调试	470
第五节	真空系统调试	475
第六节	循环水系统调试	476
第七节	凝结水系统调试	478
第八节	闭式冷水系统调试	480
第九节	除氧器及低压给水系统调试	483
第十节	电动给水泵及其系统调试	485
第十一节	旁路系统调试	487
第十二节	轴封系统调试	489
第十三节	辅助蒸汽系统调试	490
第十四节	汽动给水泵系统调试	492
第十五节	华能玉环电厂超超临界 1000MW 汽轮机调试出现问题分析及对策	495
第十四章	汽轮机整套启动调试	504
第一节	整套启动具备条件及程序	504
第二节	汽轮机整套启动风险分析及预控	508
第三节	汽轮机整组启动调试	518
第四节	调节系统试验	519
第五节	超超临界 1000MW 汽轮机甩负荷试验	524
第六节	1000MW 汽轮机及调节系统参数测试	531
第十五章	1000MW 超超临界压力汽轮机组运行及维护	536
第一节	上汽—西门子型 1000MW 汽轮机启动及停机	536
第二节	东汽—日立型 1000MW 汽轮机启动及停机	574
第三节	哈汽—东芝型 1000MW 汽轮机启动及停机	593
第四节	汽轮机在参数偏离工况下运行	609
第五节	低负荷运行	610
第六节	汽轮机典型事故、预防及处理	615
附录	缩略语及专业术语注释	620
参考文献		622

概 述

第一节 汽轮机及其系统选择

一、中国高效洁净燃煤发电技术的发展

我国电力工业总体与国外先进水平相比,存在较大差距,能耗高、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的重要因素。2002年8月开始,科技部“十五”国家科技攻关计划项目(863)“超超临界燃煤发电技术”,2003年8月的子课题“超超临界发电技术选型研究”推荐超超临界发电技术将是我国今后火电的主要发展方向;2003年11月,上海汽轮机有限公司与华能签订了“863项目”的依托工程——我国第一个超超临界华能玉环 $4\times 1000\text{MW}$ 汽轮机合同。

二、水的临界点

火电厂的工质是水,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,干饱和蒸汽才继续升温,成为过热蒸汽。但当温度超过临界温度 T_c 值时,水的液相就不存在了,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 $T_c=374.15^\circ\text{C}$, $p_c=22.129\text{MPa}$ 。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,根据机组采用的蒸汽参数划分,只有超临界和亚临界之分,超超临界是我国人为的一种区分,也称为优化的或高效的超临界参数。

在临界状态附近,水和汽的状态难以分辨。另一种理解是:当温度高于 374.15°C 时,用加压的办法是不可能使蒸汽变成水的。

锅炉、汽轮机系列通常以汽轮机进口蒸汽初压力划分等级如下:

- (1) 次中压为 2.5MPa 。
- (2) 中压为 3.5MPa 。
- (3) 次高压为 6.5MPa 。
- (4) 高压为 9.0MPa 。
- (5) 超高压为 13.5MPa 。
- (6) 亚临界为 16.7MPa 。
- (7) 超超临界为 24.1MPa 。

进入超临界 (Supercritical, 缩写为 SC, $p > 22.12\text{MPa}$) 之后参数如何分挡, 究竟超出多少才算超超临界? 对此, 目前国际上在发电行业领域中尚无统一的标准和规定。在实际应用中, 各家众说纷纭、各执一词, 但大多倾向于至少提高一个标准系列档次。多数国家把常规超临界参数的技术平台定在 $24.2\text{MPa}/566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ 上, 而把高于此参数 (不论压力升高还是温度升高, 或者两者都升高) 的超临界参数定义为超超临界 (Ultra Supercritical, 缩写为 USC) 参数。日本将压力大于 24.2MPa , 或温度达到 593°C (也有说超过 566°C) 以上的工作定义为超超临界状态; 丹麦认为蒸汽压力 27.5MPa 是超临界与超超临界的分界线等。在《中国电力百科全书》中写到: “通常把蒸汽压力高于 27MPa 称为超超临界”, 我国 863 课题 “超超临界发电技术” 将超超临界机组设定在蒸汽参数大于 25MPa , 温度高于 580°C 的范围。

超临界和超超临界实际上没有统一的定义, 一般认为, 压力为 25MPa 以上且温度为 580°C 以上, 本质上超临界与超超临界无区别。

三、超临界机组的经济性

汽轮发电机组的经济性主要由工质参数、设备的结构性能、各辅助工作系统的配置状况所决定。为提高汽轮机组的经济性, 必须在以下几个方面进行改进。

(一) 蒸汽参数及再热次数

蒸汽参数主要是指蒸汽的压力和温度。用来驱动汽轮机的单位流量蒸汽压力和温度越高, 携带的能量越大, 而做功后的压力和温度越低, 则带走的无用能量 (焓) 就越小, 这样蒸汽可能的做功能量 (理想焓降) 就越大; 在能量相同的情况下, 压力和温度越高, 可能用来做功的能量比例就越大, 无法做功而不得而被放弃的能量比例就越小 (即熵值越小)。这就是蒸汽的基本热力性质。因此, 为了提高单位流量蒸汽的做功能力和做功效率, 应当尽可能地提高进入汽轮机的新蒸汽的压力和温度, 同时尽量降低做功后乏汽的压力和温度。

1. 超超临界机组主要蒸汽参数、再热次数与热效率

提高蒸汽参数 (蒸汽的初始压力和温度)、采用再热系统、增加再热次数都是提高机组效率的有效方法。一般, 常规亚临界机组的典型参数为 $16.7\text{MPa}/538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$, 其发电效率约为 38% 。常规超临界机组的主蒸汽压力一般为 24MPa 左右, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 $538\sim 560^\circ\text{C}$; 常规超临界机组的典型参数为 $24.1\text{MPa}/538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$, 对应的发电效率约为 41% 。超超临界机组的主蒸汽压力为 $25\sim 31\text{MPa}$ 及以上, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 $580\sim 600^\circ\text{C}$ 及以上。常规超临界机组的热效率比亚临界机组高 $2\%\sim 3\%$, 而超超临界机组的热效率比常规超临界机组高 4% 以上。

在超超临界机组参数范围的条件下, 主蒸汽压力提高 1MPa , 机组的热耗率可下降 $0.13\%\sim 0.15\%$; 主蒸汽温度每提高 10°C , 机组的热耗率可下降 $0.25\%\sim 0.30\%$; 再热蒸汽温度每提高 10°C , 机组的热耗率可下降 $0.15\%\sim 0.20\%$, 即提高蒸汽的温度对提高机组热效率更有益。如果增加再热次数, 采用二次再热, 则其热耗率可下降 $1.4\%\sim 1.6\%$ 。

图 1-1 (a) 所示为蒸汽温度参数一定时蒸汽压力变化对机组热效率的影响。当压力低于 30MPa 时, 机组热效率随压力的提高上升很快, 高于 30MPa 时上升幅度较小。图 1-1 (b)、(c) 分别表示一次再热、二次再热机组蒸汽温度参数一定时蒸汽压力变化对机组热效率的影响。

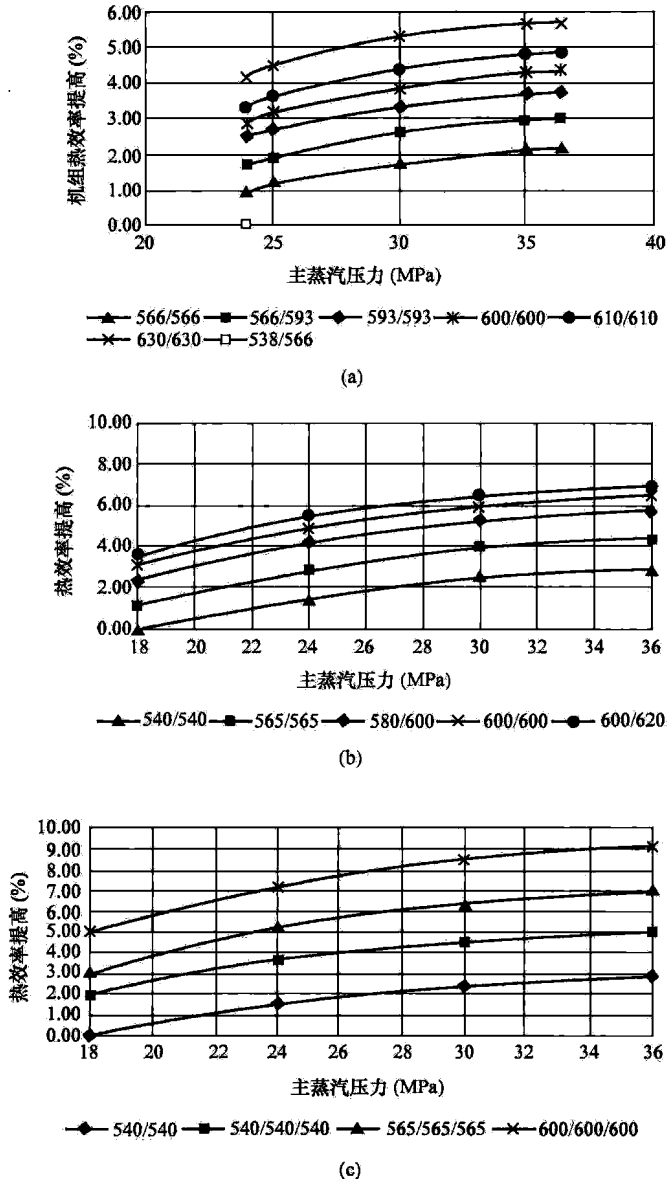


图 1-1 机组主要蒸汽参数与热效率

(a) 不同蒸汽参数时机组热效率相对提高值；(b) 一次再热机组热效率相对提高值；
(c) 二次再热机组热效率相对提高值

2. 再热次数

采用二次再热的目的是为了进一步提高机组的热效率，并满足机组低压缸最终排汽湿度的要求。在所给参数范围内，采用二次再热使机组热经济性得到提高，其相对热耗率改善值为 1.43%~1.60%。但二次再热使机组更加复杂，有两个再热器的锅炉结构复杂化，须增加一个超高压缸，一根再热冷管与再热热管和一套超高压主汽调节阀，机组长度增加，轴系趋于复杂化，汽轮机结构复杂化，存在大量需要解决的技术问题。因此，除了早期美国的三台机组外，只有日本川越电站两台 700MW 机组 (31MPa/566°C/566°C/566°C/1989 年) 和丹麦两台 415MW (28.5MPa, 580/580/580/1998) 机组采用二次再热的超超临界机组。近五年来新投运的超超临界机组没有采用二次再热。

在目前参数下，二次再热的经济性得益为 1.4%~1.6%，但机组的造价要高 10%~15%，而机组的投资一般约占电厂总投资的 40%~45%，电站投资要增加 4%~6.8%。采用二次再热存在大量需要解决的技术问题，国外制造运行业绩少，技术经济性也较差，我国在开始发展超超临界机组的阶段采用一次再热是适宜的。

3. 蒸汽参数与机组效率的关系

二次再热的优点：①降低低压缸的排汽湿度，减少末级叶片的腐蚀；根据工程经验，低压缸的排汽湿度一般控制在 10%左右，且最大不应超过 12%，否则将造成末级叶片的严重腐蚀。我国的汽轮机制造厂一般控制在 7%~8%，国外的一些制造厂稍大。例如石洞口二厂为 9.2%，在建的外高桥电厂二期为 10.6%。②降低再热器的温升，通常在每个再热器中的温升在 200℃左右，而单再热循环的温升为 280℃左右。这使得锅炉出口蒸汽温度更加均匀。③降低了高压缸的焓降。在双再热循环中，通常高压缸的焓降为 300kJ/kg，而单再热循环的焓降通常为 400kJ/kg。因此，双再热循环使得高压缸更短，刚性更好，提高了转子的稳定性。

丹麦 FLS Miljo 公司采用双再热所能提高的热效率：当参数提高至 30.0MPa/580/580/580℃时，约为 2.5%；当参数提高至 33.0MPa/610/630/630℃时，约为 3.3%。三菱资料显示，二次再热比一次再热热效率略高 1.3%~1.5%，机组的造价却高出 10%~15%，电厂投资高出约 4.5%~7.2%。

采用双再热后，对锅炉的受热面布置、再热汽温的控制提出了新的要求。目前锅炉对再热汽温的调节手段主要是采用摆动燃烧器角度和烟气挡板。若采用双再热，既要满足一次再热汽温，又要满足二次再热汽温，除采用上述两种调节手段外，势必将采用一部分喷水调温的手段，这又将影响机组的效率。而且双再热循环系统复杂，增加了二次再热的压力损失。

综合分析而言，双再热所带来的总体经济性并不十分明显。

4. 主蒸汽温度和再热蒸汽温度

提高温度对提高机组热效率的效果非常显著。在超超临界机组参数范围的条件下，主汽温度每提高 10℃，热效率可相对提高 0.25%~0.30%；再热汽温度每提高 10℃，热效率可相对提高 0.16%~0.20%。即 600℃/600℃方案比 580℃/580℃方案的热效率约可相对提高 0.92%；比 580℃/600℃方案的热效率可相对提高约 0.56%。

目前国际上可采购到的成熟材料可满足 620℃蒸汽参数的要求，不存在无法解决的否决性的技术问题和瓶颈。先进国家有相当数量超超临界机组的温度参数达到和超过 600℃/600℃，已有多年的运行业绩，其可靠性与亚临界及超临界机组处于同一水平。600℃/600℃方案与 580℃/600℃方案的技术问题只有微小的差别，不是影响温度方案选择的决定性因素。充分考虑材料的烟气侧腐蚀性能，汽水侧氧化性能，制造、加工、热处理、异种材料焊接等工艺性能，着眼于尽量提高蒸汽温度，以期最大限度地发挥现有材料的高温强度性能，在温度的选择上应既考虑先进性，又考虑成熟性，取在 600℃左右为宜。

5. 主蒸汽压力

提高压力对提高机组热效率的效果没有提高温度的效果显著。在超超临界机组参数范围的条件下，28MPa 方案比 25MPa 方案的热效率可相对提高约 0.45%，31MPa 方案比 28MPa 方案的热效率又可相对提高约 0.4%。压力提高使过程线在焓熵图上向左移动，汽轮机末级湿度增大，末级动叶片的水蚀趋于严重。低压缸的排汽湿度最大不应超过 12%。若

蒸汽参数选择 28.0MPa、580℃/600℃，汽轮机背压 4.9kPa 时，排汽湿度将达到 10.7%。在主蒸汽温度/再热蒸汽温度为 600℃/600℃、主蒸汽压力大于 30MPa 条件下，若不采用二次再热，汽轮机末级的湿度将超出设计规范。近 10 多年投运的超超临界机组中，主蒸汽压力达到 30~31MPa 的机组台数仅 3 台，其中两台是二次再热机组。鉴于技术难度、风险、技术瓶颈（汽轮机末级的湿度）及国外业绩和经验的考虑，我国在开始发展超超临界机组的阶段，主蒸汽压力采用 30~31MPa 是不适宜的。

压力提高，蒸汽汽流对转子的激振增加；固体颗粒的冲蚀趋于严重；末级湿度增大，湿汽损失加大，末级动叶片的水蚀趋于严重；关键零部件的疲劳损耗趋于严重。这些问题都是能够解决的，但压力提高，其技术风险也相对提高。主蒸汽压力为 25MPa 与 28MPa 两方案均不存在无法解决的否决性的技术问题和瓶颈。

在材料成熟的前提下，温度提高、压力基本不变的技术路线是问题单一、技术继承性好、热效率提高明显、不派生可靠性问题、投资增加少、综合优点突出的技术路线。近 10 年来，世界上新设计、新投运的机组中，这类机组是主角。日本超超临界机组仍在采用 25MPa 左右的主蒸汽压力；目前德国大于 700MW 的超超临界机组也未采用 27.5MPa 以上的主蒸汽压力。日本的东芝、日立、三菱三公司所设计制造的超临界机组的压力均不大于 25.0MPa，只有 SIEMENS 公司近年才有 25.0~30.0MPa 的业绩。

综上所述，25MPa 压力方案和 28MPa 压力方案属于同一层次。25MPa 压力方案在技术可行性、设计制造模式、国外业绩及与国外合作、技术经济方面稍好些；而 28MPa 压力方案的热效率稍高，其技术经济性需要根据实际工程而定。

根据日立公司资料，各种超临界和超超临界机组对效率的提高对比见表 1-1。

表 1-1 超临界和超超临界机组对效率的提高对比

压力 (MPa)	温度 (℃)	效率提高 (%)	压力 (MPa)	温度 (℃)	效率提高 (%)
16.6	538/538	0	25.0	566/566	+3.3
24.1	538/538	+1.9	25.0	600/600	+5.1
24.1	538/566	+2.3	30.0	600/600	+5.6
24.1	566/566	+3.1			

根据日本 EPDC 资料，以 24.1MPa/538℃/566℃ 机组功率为基础，24.1MPa/593℃/593℃ 机组的效率可提高 2.2%（实际）。

丹麦 FLS Miljo 公司认为，在蒸汽温度 535℃/540℃ 的情况下，主汽压力从亚临界的 17.0MPa 提高至常规超临界的 25.0MPa，其净热耗率可下降 2% 左右。

若在此基础上再提高至超超临界的 31.0MPa，则净热耗率还可下降 1.3% 左右，但这其中应计及了一部分采用双再热所得到的热效率 0.5%。

蒸汽温度每提高 10℃ 机组效率的提高对比见表 1-2。

表 1-2 蒸汽温度每提高 10℃ 机组效率的提高对比 (%)

项目	主 汽	一次再热汽	二次再热汽
一次再热	0.30	0.25	—
二次再热	0.25	0.15	0.15

三菱公司分析认为,在相同的蒸汽温度下,蒸汽压力 24.1MPa 的超临界机组的热效率比亚临界机组蒸汽压力 16.6MPa 提高 1.7%;再将再热汽温度提高到 566℃,热效率还将提高 0.8%,这样总的热效率将提高 2.5%。

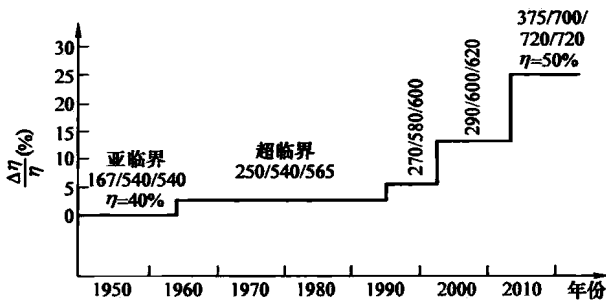


图 1-2 ALSTOM 公司机组参数与机组效率提高

一般而言,常规超临界机组的效率可比亚临界机组提高 2% 左右,而对于超超临界机组,其效率可在此基础上再提高 4% 左右。例如丹麦 FLS Miljo 公司与 ALSTOM 公司合作的 Nordjylland 电厂的超超临界机组效率已达到 47%。

ALSTOM 公司机组参数与机组效率提高见图 1-2。

玉环电厂 45.16%,泰州电厂 44.86%。

根据不同国家,不同厂商的测算,采用常规超临界参数的机组比亚临界参数的机组其净热耗率可下降 1.7%~2.5%;若采用超超临界机组,根据不同的参数,将比常规超临界机组再下降 0.7%~5.5%。

(二) 通流部分的性能

汽轮机有成千上万个零部件,对每一个零部件的结构、材料、工艺性能要求都很高,目的是使蒸汽在汽轮机内安全、高效地把内能转变为转子的动能。蒸汽的内能转变为转子动能的过程是在通流部分内进行的;对于大功率汽轮机来说,是在许多级(静叶栅和动叶栅构成了汽轮机通流部分的“级”)的静叶栅和动叶栅所构成的通道内进行的。确保蒸汽在每一级内高效率地把内能转变为转子的动能,也就是保证了通流部分的高效率。

由蒸汽在汽轮机级内的能量转化过程可知,人们的目的是使蒸汽尽可能多做功,又不会形成太大的余速,这就要选择最佳速比 u/c 。在通流部分静(动)叶平均直径上,通常选择 $u/c \approx 0.5$ 。在这种条件下,余速 c_2 最小, $c_{1u} \approx u$, $c_{2u} \approx 0$ 。此时余速 c_2 的方向近似垂直于 u ,与汽轮机的轴向基本相同。这就是说,蒸汽由初参数膨胀到背参数,其总焓降应当合理分配。在高压缸,蒸汽的体积流量变化不是很大,叶片高度的变化也较缓慢,焓降的分配差别也较小;中压缸的前几级,焓降差别也不是很大,到了中压缸后几级,特别是到了低压缸,各级焓降的差别就会很大。其目的就是为了使通流部分有合理的焓降分配,提高通流部分的效率。此外,还应注意圆周速度 u 是沿着叶片高度变化的,静动叶片的截面型线要相应地变化,以适应汽流流线的变化,应按三元流动的理论来设计和选用叶片。

1000MW 汽轮机的通流部分是由许多级(无调节级)组成的,而且还分为高压、中压、低压汽缸。每个汽缸的最后一级,余速 c_2 无法利用或无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ;在有抽汽口处,余速 c_2 也无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ;其他中间各级的余速,如果动静叶的型线匹配得当,余速能够大部分利用来作为下一级的 c_0 。

根据各级焓降应合理分配和尽可能利用余速 c_2 的要求,同一个汽缸内的通流部分应当是一个平滑、完整的汽流通道。它从高压缸第一级至高压缸最后一级、中低压缸各自的第一级到最后一级,其汽流通道应当是平滑地逐渐扩展的流线型通道。在汽轮机的通流部分中,最后一级(末级)的性能对通流部分性能的影响最大。