

660MW超超临界火力发电机组培训教材

GUOLU FENCE

锅炉分册

望亭发电厂 编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

660MW超超临界火力发电机组培训教材

.....

GUOLU FENCE

锅炉分册

望亭发电厂 编

内 容 提 要

《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》对超超临界燃煤发电机组的原理及设备只做简单介绍，着重以岗位运行知识为基础，以提高操作技能为目的，根据电厂生产一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验，详细介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理。

本书为此套教材的《锅炉分册》，全书共十五章，主要内容包括超（超）临界燃煤锅炉概述，锅炉本体，制粉系统，锅炉燃烧设备及控制，燃油系统，风烟系统，超超临界锅炉蒸发受热面的热偏差及传热恶化，超超临界锅炉的积盐及腐蚀，火焰检测系统，锅炉吹灰系统及设备，锅炉干除灰、除渣系统，超超临界直流锅炉启停及保养，锅炉的正常运行及调整，超（超）临界直流锅炉燃烧优化调整，超临界锅炉常见故障及处理。

本书可作为从事 660MW 超超临界火力发电机组锅炉设备及系统的安装调试、运行维护和检修等岗位的生产人员、技术人员和管理干部的上岗培训、在岗培训及继续教育等的培训教材，也可作为 600~1000MW 超超临界火力发电机组锅炉设备及其系统的生产人员、技术人员及大专院校相关专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

660MW 超超临界火力发电机组培训教材. 锅炉分册/望亭发电厂编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5123-2282-0

I. ①6… II. ①望… III. ①火力发电-发电机组-技术培训-教材②火电厂-锅炉运行-技术培训-教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 220934 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

*

2012 年 2 月第一版 2012 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 476 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 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

《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》

编 委 会

主任委员 陈海斌

副主任委员 齐崇勇 杨惠新

丛书主编 林 伟

编 委 朱卫风 林 伟 陈海宁 秦明宝 郭海军

胡龙弟 徐国飏 包献忠 朱建平 王建中

高 炜 陆 焯 陆建棋 李浩侃 曹 萍

瞿才良 罗志浩

序

自 1882 年中国有了商品电以来，中国电力工业的历史车轮已然驶过了三个世纪。斗转星移，大浪淘沙，在今天知识爆炸的时代，新一代的电力工作者需要怎样的知识来传承光荣，成就梦想？需要怎样的书籍来实现自我提升，成为一名真正具有竞争力的电力工作者？人生哲理、科学理论、生活常识，这些都很重要。阅读它们可以使人明智、静心、修身、达理，不断走向完美。但要成为一名优秀的电力运行工作者，除了这些之外，更为重要的是一定要有过硬的专业素质，以及坚定而执着的专业精神，这就需要有一套专业对口、学践结合、操作性强、通俗易懂的职业学习丛书，这就是我们出版《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》丛书的主要宗旨。

当前，加快转变经济发展方式已成为影响我国经济社会领域各个层面的一场深刻变革。在火电行业，大容量、高参数的火电机组因为其较低的能耗和排放成为了行业发展的主流。随着单机百万容量机组的投产发电，标志着我国的电力工业已经步入百万级时代。但是，就目前情况而言，600MW 级的机组仍是我国电网供电的中坚力量。因此，加强对 600MW 级机组基础理论的研究，深入开展 600MW 级机组的管理创新和技术创新，不断提高 600MW 级机组运行技术水平，对于促进中国电力工业更加健康快速地发展，确保国民经济稳定运行具有重要的现实意义。


2009 年 6 月，望亭发电厂通过科学论证、大胆规划、辛苦建设，在国内率先成功投运了由上海电气集团制造的 660MW 超超临界燃煤机组。投运至今，各项性能指标在同类型机组中处于先进行列，并成为中国华电集团 600MW 级标杆机组。“追求卓越，勇于创新”的企业精神造就了今天望亭发电厂的再度辉煌，有

着崇尚科学、不断精益求精传统的“望电人”紧紧依托自身日积月累、扎实深厚的技术底蕴，立足 660MW 级超超临界燃煤机组基建生产运行所掌握的第一手宝贵经验，加紧研究、认真总结、不断提炼，迅速建立起一套体系完善、环节精益、过程闭环、统筹兼顾的运营管控理论模式，锻炼出一支业务精、作风硬、素质强的职工队伍，为更好地发挥机组运营潜效、不断提升内生效益奠定了理论和技术基础，为实现超超临界机组在中国更好地发展和运营做出了自己应有的贡献。

本套丛书编撰历时两年有余。两年来，在望亭发电厂党委和厂部的关心支持下，集聚厂内技术骨干的编撰团队克服了生产任务繁重、技术资料缺乏、编撰经验不足等诸多困难，充分发挥“望电人”严谨求实的工作作风，勤钻研、巧思考、多实践，力求在内容上理论联系实际，在表述上做到通俗易懂。本套丛书包括《汽轮机分册》、《电气分册》、《锅炉分册》、《脱硫脱硝分册》、《化学分册》、《燃料分册》、《热控分册》。针对发电厂工作的特点，本套丛书对 660MW 超超临界燃煤发电机组设备的原理只做简单介绍，着重以岗位运行知识为基础，以提高技能操作能力为目的，根据电厂一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验，介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理，有效提升了本书的实用性，使该书成为国内少有的能够全面、系统地反映该类型机组的培训教材。

时代在变，创新的精神和力量是永恒的。我们希望本套丛书的出版，能够成为一个契机和交流的载体，为推动低碳节能的 660MW 超超临界燃煤机组在中国更好更快地发展增添一份力量。

由于编撰人员的理论水平和实践经验有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。



2011 年 4 月

前 言

随着电力工业技术的不断发展，用电量的持续增加和世界范围内环保形势的日趋严峻，大容量、高参数、高效率的超超临界大型发电机组正逐渐成为我国电力系统的主力发电机组。大型超超临界发电机组普遍采用低 NO_x 燃烧以及烟气脱硫脱硝技术，大幅度降低了二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放。低煤耗、高环保的超超临界发电机组目前正成为我国电力行业“上大压小”、“节能减排”的首选机型。

为使广大电力生产岗位工人、技术人员和管理人员熟悉、了解和掌握 660MW 超超临界大型燃煤火力发电机组的性能及特点，中国华电集团公司望亭发电厂在中国电力出版社的大力支持下，组织各级技术人员耗时两年时间，精心编写了《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》。

针对发电厂工作的特点，本套教材对 660MW 超超临界燃煤发电机组设备的原理只做简单介绍，着重以岗位运行知识为基础，以提高操作技能为目的，根据电厂生产一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验，详细介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理，力求能以平实的语言及通俗的阐述，更好地满足 660MW 超超临界燃煤机组岗位运行、技能操作和继续教育的需要。本套教材也可供高等院校有关专业的相关师生参考。

本书为《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》锅炉分册，共十五章，由陆建棋主编，包献忠主审，胡隆、杨波、狄亮、杨国庆、周建庆、谢建民、朱伟、徐亮、朱建峰、贺晓忠、乐国强、沈梅芳、金志伟、常青、葛红频等参与本书编写，全书由陆建棋统稿。

本分册在编写过程中，参阅了部分已正式出版的技术文献及制造厂、设计院、安装单位、调试单位的有关说明书、图纸等技术资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，错漏之处在所难免，敬请读者批评指正，并提出宝贵意见。

编者

2011 年 4 月



目 录

序

前言

第一章 超（超）临界燃煤锅炉概述	1
第一节 锅炉的分类.....	1
第二节 超（超）临界火电技术发展状况.....	3
第三节 660MW 超超临界压力锅炉设备概述	10
第二章 锅炉本体	21
第一节 省煤器	21
第二节 炉膛与水冷壁	24
第三节 过热器与再热器	36
第四节 安全阀	44
第五节 启动系统	50
第三章 制粉系统	55
第一节 制粉系统概述	55
第二节 制粉系统设备	61
第三节 制粉系统工作流程	85
第四节 制粉系统的控制与调节	86
第五节 660MW 锅炉制粉系统运行及故障	90
第四章 锅炉燃烧设备及控制	93
第一节 炉膛	93
第二节 燃烧器	94
第三节 新型煤粉燃烧技术	97
第四节 锅炉燃烧系统的控制	98
第五章 燃油系统	103
第一节 燃油系统及设备.....	103
第二节 燃油系统的运行与维护.....	106
第三节 燃油系统故障分析和处理.....	108

第四节	微油点火煤粉燃烧器系统及设备	109
第五节	等离子点火燃烧器系统及设备	115
第六章	风烟系统	120
第一节	风烟系统概述	120
第二节	送风机和一次风机	122
第三节	引风机	126
第四节	空气预热器	127
第七章	超超临界锅炉蒸发受热面的热偏差及传热恶化	135
第一节	直流锅炉蒸发受热面的热偏差及其防止措施	135
第二节	超超临界锅炉蒸发受热面的传热恶化	136
第八章	超超临界锅炉的积盐及腐蚀	138
第一节	锅炉的腐蚀	138
第二节	锅炉的锅内腐蚀	139
第三节	超超临界锅炉盐类溶解和沉积机理	139
第四节	超超临界机组水汽品质控制	142
第五节	锅炉的低温腐蚀	143
第六节	锅炉的高温腐蚀	145
第七节	660MW 超超临界机组高温氧化皮防止措施	147
第九章	火焰检测系统	148
第一节	火焰检测系统原理	148
第二节	火焰检测系统的基本构成及功能	149
第三节	660MW 锅炉火焰检测系统	150
第四节	660MW 锅炉火焰检测装置存在的问题及改进措施	152
第十章	锅炉吹灰系统及设备	156
第一节	锅炉受热面积灰和结渣的原因及危害	156
第二节	锅炉吹灰器及其布置	157
第三节	锅炉受热面的吹灰	158
第四节	660MW 超超临界直流锅炉吹灰系统	160
第十一章	锅炉干除灰、除渣系统	161
第一节	电除尘器的类型及结构	161
第二节	电除尘器的工作原理	164
第三节	气力除灰系统设备与运行	165
第四节	干式排渣系统及设备	169
第五节	干式排渣系统的运行与维护	172
第十二章	超超临界直流锅炉启停及保养	179

第一节	超超临界锅炉的启动方式及启动特点	179
第二节	660MW 超超临界锅炉的启动	184
第三节	660MW 超超临界锅炉的停用	199
第四节	660MW 超超临界锅炉的停炉保养	205
第十三章	锅炉的正常运行及调整	208
第一节	锅炉运行调整的任务	208
第二节	锅炉运行控制的特点	208
第三节	蒸汽温度的控制与调整	212
第四节	锅炉负荷与汽压的控制与调整	216
第五节	锅炉燃烧调整	218
第六节	单元机组的负荷调节	228
第七节	超超临界锅炉的运行与调整	230
第十四章	超（超）临界直流锅炉燃烧优化调整	233
第一节	锅炉设备概况	233
第二节	燃烧优化调整试验方法和分析	234
第三节	炉膛结渣特性分析	252
第四节	超（超）临界锅炉燃烧优化调整结论	255
第十五章	超临界锅炉常见故障及处理	258
第一节	锅炉事故的种类和处理原则	258
第二节	紧急停炉处理	260
第三节	直流锅炉给水温度突降	262
第四节	锅炉受热面损坏	264
第五节	锅炉汽温异常	269
第六节	锅炉汽压异常	278
第七节	锅炉熄火及防爆	281
第八节	锅炉尾部烟道再燃烧及防止措施	283
第九节	锅炉燃料品质的突变	287
第十节	锅炉辅机故障	288
第十一节	制粉系统故障	301
第十二节	厂用电源故障	309

第一章

超(超)临界燃煤锅炉概述

电力工业是国民经济发展的基础工业。电力工业的发展水平和电能供应的数量和质量,是衡量工业、农业、国防和科技现代化水平的重要标准。发电能源的种类很多,如火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电、地热发电、潮汐发电等。当前世界上主要有三类发电形式,分别为火力发电、水力发电和核能发电。从总体上讲,火力发电仍然是世界电能生产的主要形式,我国由于能源构成的特点更是如此。

第一节 锅炉的分类

锅炉可以按循环方式、燃烧方式、排渣方式、运行方式,以及燃料、蒸汽参数、炉型、通风方式等进行分类,其中按循环方式和蒸汽参数进行的分类最为常见。

一、循环方式分类

锅炉按照循环方式可分为自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉。

(1) 自然循环锅炉。给水经给水泵升压后进入省煤器,受热后进入蒸发系统。蒸发系统包括汽包、不受热的下降管、受热的水冷壁以及相应的集箱等。当给水在水冷壁中受热时,部分水会变为蒸汽,所以水冷壁中的工质为汽水混合物,而在不受热的下降管中,工质则全部为水。由于水的密度大于汽水混合物的密度,因此,在下降管和水冷壁之间会产生压力差,在这种压力差的推动下,给水和汽水混合物在蒸发系统中循环流动。这种循环流动是由于水冷壁受热而形成的,没有借助其他的能量消耗,所以称为自然循环。在自然循环中,每千克水循环一次只有一部分转变为蒸汽,或者说每千克水要循环几次才能完全汽化,循环水量大于生成的蒸汽量。单位时间内的循环水量同生成的蒸汽量之比称为循环倍率。自然循环锅炉的循环倍率为4~30。

(2) 控制循环锅炉。在循环回路中加装循环水泵,就可以增加工质的流动推动力,形成控制循环锅炉。在控制循环锅炉中,循环流动压头要比自然循环时增强很多,可以比较自由地布置水冷壁蒸发面,即蒸发面可以垂直布置,也可以水平布置,其中的汽水混合物既可以向上流动,也可以向下流动,所以可以更好地适应锅炉结构的要求。控制循环锅炉的循环倍率为3~10。

自然循环锅炉和控制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将省煤器、蒸发部分和过热器分隔开,并使蒸发部分形成密闭的循环回路。汽包内的大容积能保证汽和水的良好分离。但是,汽包锅炉只适用于临界压力以下的锅炉。

(3) 直流锅炉。直流锅炉没有汽包,工质一次通过蒸发部分,即循环倍率为1。直流锅

炉的另一特点是，在省煤器、蒸发部分和过热器之间没有固定不变的分界点，水在受热蒸发面中全部转变为蒸汽，沿工质整个行程的流动阻力均由给水泵来克服。如果在直流锅炉的启动回路中加入循环泵，则可以形成复合循环锅炉。即在低负荷或者本生负荷以下运行时，由于经过蒸发面的工质不能全部转变为蒸汽，因此在锅炉的汽水分离器中会有饱和水分离出来，分离出来的水经过循环泵再输送至省煤器的入口。这时流经蒸发部分的工质流量超过流出的蒸汽量，即循环倍率大于1。当锅炉负荷超过本生点以上或在高负荷运行时，由蒸发部分出来的是微过热蒸汽。这时循环泵停运，锅炉按照纯直流方式工作。

二、蒸汽参数分类

锅炉按照蒸汽参数可分为低压锅炉（出口蒸汽压力，下同， $\leq 2.45\text{MPa}$ ）、中压锅炉（ $2.94\sim 4.90\text{MPa}$ ）、高压锅炉（ $7.8\sim 10.8\text{MPa}$ ）、超高压锅炉（ $11.8\sim 14.7\text{MPa}$ ）、亚临界压力锅炉（ $15.7\sim 19.6\text{MPa}$ ）、超临界压力锅炉（ $> 22.1\text{MPa}$ ）和超超临界压力锅炉（ $> 27\text{MPa}$ 或主蒸汽温度 $\geq 580^\circ\text{C}$ ）。

三、其他分类

(1) 锅炉按照燃烧方式可分为层式燃烧锅炉、悬浮燃烧锅炉、旋风燃烧锅炉和循环流化床锅炉。其中，悬浮燃烧锅炉常见的火焰形式有切向、墙式及对冲、U型、W型等。

(2) 锅炉按照使用的燃料可分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉及燃用其他燃料（如油页岩、垃圾、沼气等）的锅炉。

(3) 锅炉按照排渣方式可分为固态排渣和液态排渣两种。固态排渣是指炉膛下部排出的灰渣呈灼热的固态，落入排渣装置经冷却水粒化后排出。液态排渣是指炉膛内的灰渣以熔融状态从炉膛底部排出。20世纪五六十年代，为强化燃烧和解决燃用低挥发分、低灰熔点燃煤的困难，液态排渣炉发展较快。但因燃烧温度高、排出 NO_x 较多对环境保护不利、对煤

种变化敏感、运行可靠性易受影响等因素限制，现在发展基本停滞，大部分锅炉均采用固态排渣方式。

(4) 锅炉按照通风方式可分为平衡通风锅炉、微正压锅炉（ $2\sim 4\text{kPa}$ ）和增压锅炉。所谓平衡通风锅炉，是指进入锅炉的供风由风机提供，燃烧后的烟气经风机抽吸出去，炉膛燃烧室呈负压状态（ $-200\sim -50\text{Pa}$ ）。现在大型电站锅炉基本都采用平衡通风方式。微正压锅炉炉壳密封要求高，多用于燃油、燃气锅炉。增压锅炉炉内烟气压力高达 $1\sim 1.5\text{MPa}$ ，多用于燃气—蒸汽联合循环锅炉。

(5) 按锅炉类型进行分类，有II型锅炉、箱型锅炉、塔型锅炉（布置见图1-1）及D型锅炉等。II型锅炉是电站

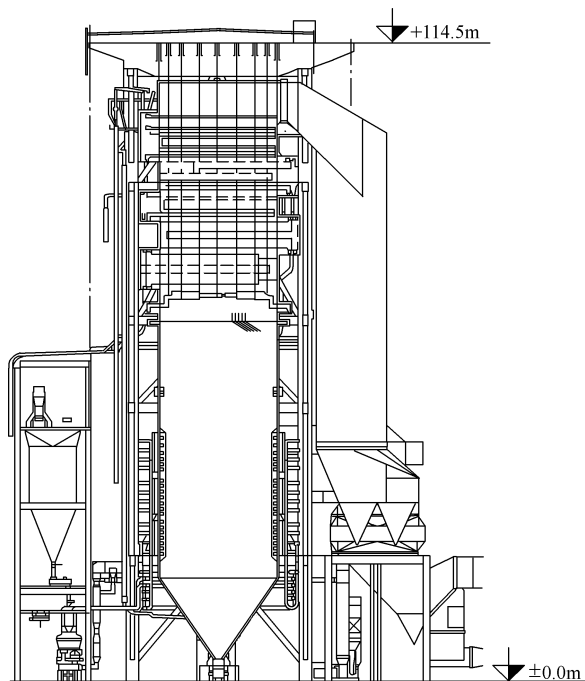


图 1-1 塔型锅炉布置示意

锅炉中最常见的一种炉型,几乎适用于各种容量和不同燃料。箱型锅炉和D型锅炉主要燃用重油和天然气。塔型锅炉更适用于多灰分烟煤和褐煤,德国此种炉型较多。塔型锅炉最先出现于欧洲。促进塔型锅炉发展的原因主要可归结为燃料及灰渣特性,以及锅炉容量增大引发的结构布置上的问题两个方面。

欧洲大陆的许多国家,如德国、捷克、波兰、罗马尼亚、比利时、瑞士、南斯拉夫等国家的褐煤资源非常丰富,为了燃用这种高挥发分、灰分、水分和低热值的褐煤,解决飞灰对对流受热面的磨损,以及锅炉容量增大、布置困难的问题,于20世纪60年代开发了适合于褐煤的塔型锅炉。其后,在容量上也经历了由小到大的发展,被广泛应用于燃用不同煤种。

我国于20世纪70年代末引进了几台300MW级机组的塔型锅炉。塔型锅炉具有如下特点:

1) 防磨性能。由于塔型布置为单烟道,烟气垂直上升流经各对流受热面,烟气中的灰粒因受到重力作用,上升速度将减慢;灰粒与烟气有速度差,因而灰粒对塔型锅炉的对流受热面的磨损大大减轻,而且灰粒不会因转弯而发生分离,且飞灰浓度比较均匀,不致产生局部严重磨损,因此尤其适用于高灰分煤种。

2) 便于疏水。塔型锅炉的过热器、再热器及省煤器均为水平布置,所以管内疏水可全部排尽,有利于启动、停炉检查和保养,也有利于过热器、再热器酸洗。II型锅炉则难以做到。

3) 对流受热面布置方便。II型布置时,由于受到尾部烟道空间位置的限制,烟速很难降到塔型布置的烟速。以300MW机组II型布置的直流锅炉为例,如果其他条件不变,省煤器烟速从8m/s下降到6m/s,传热系数约减小18%,受热面积约需增加22%;同样,高温过热器的烟速从12.5m/s降到8m/s,传热系数约下降27.6%,受热面积约需增加40%。显然,II型布置锅炉要增加如此多的受热面较为困难,而塔型布置锅炉则容易做到。

4) 煤种适应性广。凡II型布置能适应的煤种,塔型布置都能适应;反之,II型布置较难实施的煤种,塔型锅炉也能实施。根据德国电厂的实践,塔型锅炉不仅适用于燃油、燃气,也适用于燃煤,更适于燃用高灰分、多水、低熔点、低热值的褐煤以及高灰分的烟煤、贫煤等。

5) 占地面积小,且有利于制粉及燃烧系统设备和烟、风、煤粉管道的布置。

6) 炉顶的穿墙管大量减少,易于解决炉顶的密封问题。

7) 锅炉钢架金属耗量大。塔型布置的锅炉炉体高,整个炉体悬吊在炉顶,荷载高且集中,从而使锅炉支撑结构金属耗量相对增大。

8) 安装与检修复杂。塔型锅炉炉体高,使设备安装和检修复杂程度高,锅炉吊装需使用高型起吊设备或液压提升装置及专用机具,且难度也较大,安装工期也较其他常用炉型长。

第二节 超(超)临界火电技术发展状况

一、超(超)临界的定义

水的临界状态参数为22.115MPa、374.15℃,在水的参数达到该临界点时,水的完全

汽化会在瞬间完成，即在临界点时，饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽、水共存的两相区存在，两者参数不再有分别。当机组参数高于这一临界状态参数时，通常称其为超临界参数机组。高效超临界（High Efficiency Supercritical）机组或超超临界（Ultra Supercritical，简称 USC）机组是相对于常规超临界机组而言的，其工作压力大于 27.0MPa 或工作温度高于 580℃。

对蒸汽动力装置循环的理论分析结果表明，提高初参数和降低循环的终参数都可以提高循环的热效率。实际上，蒸汽动力装置的发展和进步就是一直沿着提高参数的方向前进的。

经过几十年的发展，目前，超临界火电技术是世界上唯一的先进、成熟和达到商业化规模应用的洁净煤发电技术，已在不少国家推广应用并取得了显著的节能和改善环境的效果。当前，实际应用中机组的主蒸汽压力最高已达到 31MPa，主蒸汽温度最高已达到 610℃，容量等级在 300~1300MW 内均有业绩。与同容量亚临界火电机组的热效率比较，理论上采用超临界参数可使效率提高 2%~2.5%，采用更高的超临界参数可提高 4%~5%。目前，世界上先进的超临界机组效率已达到 47%~49%，同时先进的大容量超临界机组具有良好的运行灵活性和负荷适应性；超临界机组大大降低了 CO₂、粉尘和有害气体（主要 SO_x、NO_x 等）等污染物的排放，具有显著环保、洁净的特点。实际运行业绩表明，超临界机组的运行可靠性指标已经不低于亚临界机组，有的甚至更高；另外，相对其他洁净煤发电技术来说，超临界技术具有良好的技术继承性。因此，超临界发电技术得到了各国电力界的重视，又进入了新一轮的发展时期，进一步发展的方向是保证其可用率、可靠性、运行灵活性和机组寿命等的同时，进一步提高蒸汽的参数，从而获得更高的效率和环保性。

我国电力工业总体与国外先进水平相比有较大差距，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。

二、超临界锅炉的特点

所谓超临界锅炉，是指运行参数超过临界点的锅炉，即主蒸汽压力高于临界压力（22.13MPa）的锅炉。超临界锅炉具有如下特点：

（1）热效率高、热耗低。超临界机组热耗比亚临界机组低 2%~2.5%，故可节约燃料，降低能源消耗和大气污染物的排放量。

（2）超临界压力时，水和蒸汽比体积相同、状态相似，单相的流动特性稳定，没有汽水分层和在中间集箱处分配不均的困难，并不需要像亚临界压力锅炉那样用复杂的分配系统来保证良好的汽水混合，回路比较简单。

（3）超临界锅炉水冷壁管道内单相流体阻力比亚临界汽包锅炉双相流体阻力低。

（4）超临界压力下工质的热导率和比热容较亚临界压力的低。

（5）超临界压力工质的比体积和流量较亚临界的小，故锅炉水冷壁管内径较小，汽轮机的叶片可以缩短，汽缸可以变小，从而降低了质量与成本。

（6）超临界压力直流锅炉没有大直径厚壁的汽包和下降管，制造、安装和运输方便；同时，取消汽包而采用汽水分离器，汽水分离器远比亚临界锅炉的汽包小，内部装置也很简单，制造工艺也相对容易，相应地降低了成本。

（7）启动、停炉快。超临界压力直流锅炉不存在汽包上下壁温差等安全问题，而且其金属质量和储水量小，因而锅炉的储热能力差，所以其增减负荷允许的速度快，启动、停炉时

间可大大缩短。一般在较高负荷(80%~100%)时,其负荷变动率可达10%/min。

(8) 超临界压力锅炉适宜于变压运行。

(9) 超临界压力锅炉的蓄热特性不及汽包锅炉,外界负荷变动时,汽温、汽压变化快而必须有相当灵敏可靠的自动调节系统,锅炉机组的自控水平要求也较高。

三、超临界发电技术的发展过程

世界上超临界发电技术的发展过程大致上可分为以下两个阶段。

第一阶段:20世纪50~80年代,主要以美国、德国、日本等为技术代表。初期技术发展的起步参数就是超临界参数。20世纪50年代美国最先投运两台超临界机组,即1957年Philo 6号(125MW、31.0MPa/621℃/566℃/538℃)和1958年Eddystone 1号(325MW、34.3MPa/649℃/566℃/566℃)。但由于所采用的过高蒸汽参数超越了当时材料的实际发展水平,从而导致诸如机组运行可靠性差等问题的发生,但同时也积累了一定的经验。在经历了初期过高的参数后,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。由于燃料价格下降等诸多原因,发展速度比较缓慢,直至20世纪80年代,美国超临界机组的参数基本稳定在该水平。

从20世纪80年代初期开始,随着材料的进步和发展,以及对电厂水化学方面认识的深入,设计者们克服了早期超临界机组所遇到的问题。期间对已投运的机组进行了优化改造,大大提高了机组的经济性、可靠性、运行灵活性,其可靠性和可利用指标已经达到甚至超过相应的亚临界机组。超临界机组的市场逐步转移到欧洲及日本,并涌现出一批新的超临界机组。

第二阶段:20世纪90年代开始,国际上高效超超临界机组进入了快速发展的阶段,其背景原因在于环保要求日益严格,同时,新型耐高温材料的开发成功、关键技术的成熟和常规超临界技术的成功也为超超临界机组的发展提供了必要的条件。在此阶段,技术发展主要以日本为代表,进入了新一轮发展阶段,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。该阶段机组的发展具有以下三个方面的趋势:

(1) 蒸汽压力并不高,多为25MPa左右,而蒸汽温度相对较高。这种方案可以降低造价,使结构简单、可靠性增加,通过提高温度来获得机组热效率更有效。近期欧洲及日本生产的新型机组,大多数压力均保持在25MPa左右,温度也提高到了580~610℃。

(2) 蒸汽压力和温度同时都取较高值(28~30MPa,600℃左右),从而获得更高的效率,技术发展主要以欧洲为代表。部分机组采用高温的同时,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蒸汽温度或二次再热循环。

(3) 更大容量等级的超超临界机组的开发。决定机组容量的关键因素之一是低压缸的排汽能力,与蒸汽参数无直接关系。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。经过40多年的不断完善和发展,目前超(超)临界机组的发展已进入成熟和实际应用阶段,具有更高参数的高效超临界机组已经成功地投入商业运行。

随着机组蒸汽压力和蒸汽温度的不断提高,对机组材料的要求也逐渐提高,如图1-2所示。

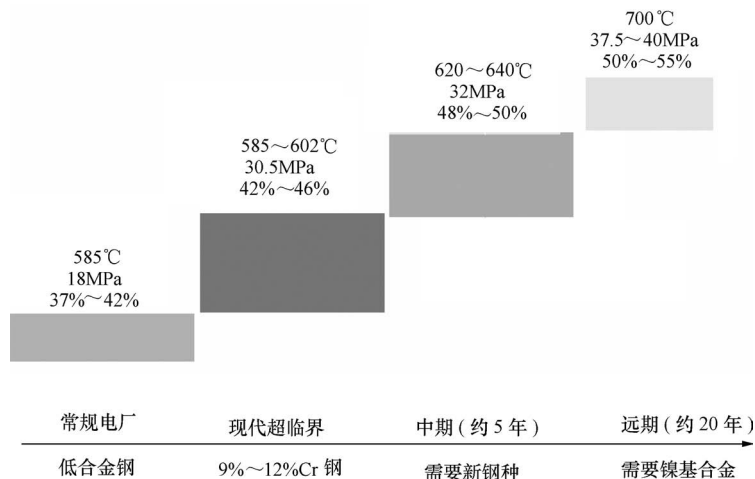


图 1-2 机组参数发展目标及所用材料要求

四、我国主要超超临界机组

我国投运和在建的超超临界机组情况见表 1-1。

表 1-1

我国投运和在建的超超临界机组情况

机组名称	出力 (MW)	蒸汽参数		开始运行时间
		压力 (MPa)	温度 (°C)	
外高桥二期	900	24.9	538/566	2003 年 5 月
华能玉环 1 号	1000	26.25	600/600	2006 年 11 月
华能玉环 2 号	1000	26.25	600/600	2006 年 12 月
邹县四期 1 号	1000	25	600/600	2006 年 12 月
华能玉环 3、4 号	1000	26.25	600/600	2007 年 11 月
外高桥三期	1000	27	600/600	已投运
华电望亭 3、4 号	660	26.15	605/603	2009 年 7 月

五、超（超）临界火电技术展望

根据世界上先进的超临界电站的发展经验，机组效率的提高可能来源于许多方面的因素，如较低的锅炉排烟温度，高效的主、辅设备，煤的良好燃烧，较高的给水温度，较低的凝汽器压力，较低的系统损失，蒸汽的再热级数等。据研究报告估计，仅由于提高蒸汽参数而提高效率最多，为效率总提高量的 50% 左右。因此，发展高效超临界机组和超超临界机组的工作，不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开发和研究工作。

由于煤炭发电技术具有煤可以远距离运输，还可以大量储存的优势，因此煤的供应具有极好的安全保证。随着超临界技术的不断发展和进步，在众多具有竞争力的先进发电技术中，超临界发电技术仍是一种极其重要的选择。超临界机组具有广泛的发展前景。

由于采用了超临界参数，因此，对机组的设计、制造和运行等方面提出了更高的要求 and 标准，也带来了一些新的问题，需要在技术上进一步开展试验和研究工作。在这些问题上，

有的是属于超临界机组本身所特有的技术问题,如超临界参数下部件的材料特性问题,工质流体热物性的变化对锅炉传热、水动力、热偏差和动态特性的影响分析,汽轮机缸体结构与转子的冷却技术等;有的是属于火电技术在持续发展和技术进步过程中的一些共性问题,如机组轴系稳定性研究、叶片固体颗粒侵蚀的技术问题、汽轮机末级长叶片的开发设计技术等,还有的则是国产化条件下所需要解决的技术问题。此外,对于更大容量的超临界机组,还需要解决机组大型化带来的技术问题。

六、我国发展超(超)临界火电机组的必要性和基础条件

煤炭在我国一次能源结构中的主导地位,决定了我国电力生产中以煤电为主的格局。但是,我国煤炭可采量及开采能力受到一定的限制,煤炭供需矛盾仍很突出,并随着火电的发展进一步扩大。另外,煤炭产地与高用电负荷地区相分隔,致使煤炭生产和运输一直是制约电力工业发展的重要因素。

为扭转我国火电机组煤耗居高不下的局面,缩小我国火电技术水平与国外先进技术水平的差距,采用先进的超(超)临界火电技术对我国的现有火电结构进行改造势在必行,发展国产大容量的超(超)临界火电机组十分必要。

超(超)临界技术是我国电力工业升级换代,以及缩小与发达国家技术和装备差距的新一代技术。超超临界发电机组将是未来20~30年我国电力工业生产的主要机组形式。我国国民经济的迅速发展,对电力的需求越来越大,同时对环保和控制污染排放的要求也越来越高。因此,积极发展高效、节能、环保的超临界火力发电机组势在必行。

总之,大型超临界机组的国产化,是提高机组热效率、改善环境状况和优化我国火电装机结构最现实和最有效的途径,具有显著的社会效益和经济效益。因此,发展超临界和超超临界机组是我国目前发展洁净煤技术的必然选择。

七、我国超超临界锅炉技术概况

我国发电装机总容量和发电量均居世界前列。其中,火电是我国主要的发电方式,而我国的火力发电是以煤作为主要燃料。当前,我国燃煤电站存在的突出问题是机组效率低、供电煤耗高。

目前,发展先进的燃煤发电技术应考虑的问题是效率、环保性能、可靠性、机动性、投资和废弃物的利用等。为此,今后发展先进燃煤发电技术的主要途径是:燃煤联合循环和高效超临界发电技术。该技术的基本设计思想是:提高机组发电效率,减少燃料消耗,从而降低比电价,并减少有害物质的排放。高效超临界发电技术则是在发电技术已很成熟的传统燃煤超临界发电技术的基础上作了进一步的改善,采用了更高的蒸汽初参数和先进的烟气脱硫、脱硝技术。

超临界机组已是世界上比较成熟的一项技术,其效率比亚临界机组有大幅度提高,因而在发电量相同的条件下,耗煤比亚临界机组低,排放的污染物也比较少。因此,加快建设和发展高效超临界火电机组,是解决电力短缺、能源利用率低和环境污染严重的最现实和最有效的途径。高效超临界机组有望成为我国下一代燃煤火力发电的主力机组。

2002年,我国将开发超超临界锅炉列为国家“863”重大项目攻关计划;2003年,原国家经济贸易委员会和科技部都将超超临界锅炉列入了国家重大技术装备研制计划。

我国当前在建电厂项目中主要采用亚临界机组和超临界机组。亚临界机组以国产为主,