

1000MW

超超临界机组调试技术丛书

化学

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

化学

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 化学》分册,共分三篇十六章。主要介绍了超临界机组的水汽特点和循环控制要求、超超临界机组的化学分系统系统及其调试技术、超超临界机组的化学清洗、超超临界机组的汽水品质监督要求及给水处理工况、超超临界机组的腐蚀、结垢、积盐的控制。

本书可供从事超(超)临界机组化学专业调试、运行、维修的工程技术人员及管理人员学习阅读,为同类型机组化学水处理设备及系统的调试、运行、维修提供借鉴及参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学/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 978-7-5123-9229-8

I. ①化… II. ①江… III. ①火电厂-电厂化学 IV. ①TM621. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 080784 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>)

航远印刷有限公司印刷

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 19.5 印张 473 千字

印数 0001—2000 册 定价 80.00 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 管诗骈 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 管诗骈 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 爻建军 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 and 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。

本丛书兼顾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。本丛书是从事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,发电机组的最大单机容量已经达到 1000MW,机组参数也由亚临界参数提高到超临界、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。

(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,这就要求水处理设备和系统从调试开始就必须健康稳定运行。机组化学清洗和整套启动期间的汽水质量监督也是超(超)临界机组投运前的重要调试内容,执行完善的化学清洗工艺和严谨的水汽质量监督措施,对提高超(超)临界机组投运水平,防止受热面及汽轮机通流部分的结垢、积盐、腐蚀具有事半功倍的效果。

为了提高超(超)临界机组水处理设备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 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丛书 化学》。本书对指导今后超(超)临界机组的化学调试、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。

全书共分三篇十六章,其中第一、十二章由于海全编写,第二章由管诗骈、黄治军编写,第三、四、五章由徐仕先、帅云峰编写,第六、七、八章由丁卫华、高远编写;第九、十章由姜思洋编写;第十一、十三~十六章由刘红兴、丁建良编写,全书由刘红兴、于海全统稿。

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 绪论	1
第一章 超超临界火电机组的水汽性质	1
第一节 火电厂水的作用	1
第二节 超临界水的性质和特性	2
第三节 超超临界机组的发展及水汽循环控制要求	4
第二章 调试工作	8
第一节 概述	8
第二节 分部试运工作准备	10
第三节 分部试运工作内容	11
第四节 调试工作管理	17
第二篇 超超临界机组的化学调试	27
第三章 原水预处理系统调试	27
第一节 概述	27
第二节 主要设备及系统流程	32
第三节 调试工作程序	40
第四节 常见问题及处理	46
第四章 超滤及反渗透	50
第一节 概述	50
第二节 主要设备及系统流程	58
第三节 调试工作程序	65
第四节 常见问题及处理	70
第五章 离子交换与电除盐 (EDI)	78
第一节 概述	78
第二节 主要设备及系统流程	85
第三节 调试工作程序	97
第四节 常见问题及处理	105

第六章 凝结水精处理系统	112
第一节 概述.....	112
第二节 主要设备及系统流程.....	114
第三节 调试工作程序.....	125
第四节 常见问题与处理.....	137
第七章 机组加药系统	141
第一节 概述.....	141
第二节 主要设备及系统流程.....	141
第三节 调试工作程序.....	144
第四节 常见问题及处理.....	145
第八章 汽水取样及在线分析仪表系统	147
第一节 概述.....	147
第二节 取样装置主要设备和主要仪表	149
第三节 调试工作程序.....	161
第四节 常见问题与处理.....	167
第九章 循环冷却水系统	169
第一节 概述.....	169
第二节 主要设备及系统流程.....	179
第三节 调试工作程序.....	182
第四节 常见问题与处理.....	185
第十章 废水处理系统	188
第一节 概述.....	188
第二节 系统流程及主要设备.....	193
第三节 调试工作程序.....	201
第四节 常见问题与处理.....	204
第十一章 制(供)氢系统	205
第一节 概述.....	205
第二节 主要设备及工艺流程.....	207
第三节 调试工作程序.....	212
第四节 常见问题与处理.....	216
第十二章 1000MW 超超临界机组的化学清洗	219
第一节 概述.....	219
第二节 化学清洗工艺控制.....	221
第三节 典型化学清洗工艺.....	231
第四节 化学清洗存在的问题与处理.....	243

第三篇 超超临界机组的化学监督	247
第十三章 超超临界机组水汽质量监督	247
第一节 水汽质量监督要求和意义	247
第二节 水化学工况	251
第三节 水汽质量标准	264
第十四章 超超临界机组启动期间化学监督	267
第一节 启动前的化学监督	267
第二节 整套启动期间的化学监督	268
第十五章 超超临界机组的加氧处理	274
第一节 加氧处理前的评估	274
第二节 加氧处理的实施	277
第三节 加氧处理运行监督	278
第十六章 超超临界机组的结垢、积盐与腐蚀	281
第一节 水汽系统杂质的来源及危害	281
第二节 锅炉受热面结垢	282
第三节 蒸汽系统的积盐与腐蚀	286
第四节 受热面金属氧化皮的形成与防治	292
参考文献	300



第一篇 绪 论

第一章 超超临界火电机组的水汽性质

第一节 火电厂水的作用

一、火电厂生产流程简介

火电厂是以煤炭为主要燃料生产电能的工厂，其生产过程就是把化学能转换为电能的过程。将经过加工磨制的煤粉送到炉膛中燃烧，放出热量用来加热锅炉中的给水，使其变成蒸汽，把燃料中的化学能变为热能。具有一定温度和压力的蒸汽冲动汽轮机转子，把热能转换为机械能，与汽轮机同轴的发电机把机械能再转换为电能。

火电厂能量转换流程如下：

化学能（煤粉中）→热能（燃烧产生）→机械能（汽轮机冲转）→电能（发电机）

典型超超临界直流机组热力系统流程：凝汽器→凝结水泵→精处理系统→轴封加热器→低压加热系统→除氧器→给水泵→高压加热系统→省煤器→水冷壁→启动分离器→过热器→汽轮机高压缸→低温再热器→高温再热器→汽轮机中压缸→汽轮机低压缸→凝汽器。

直流机组热力系统简化流程如图 1-1 所示。

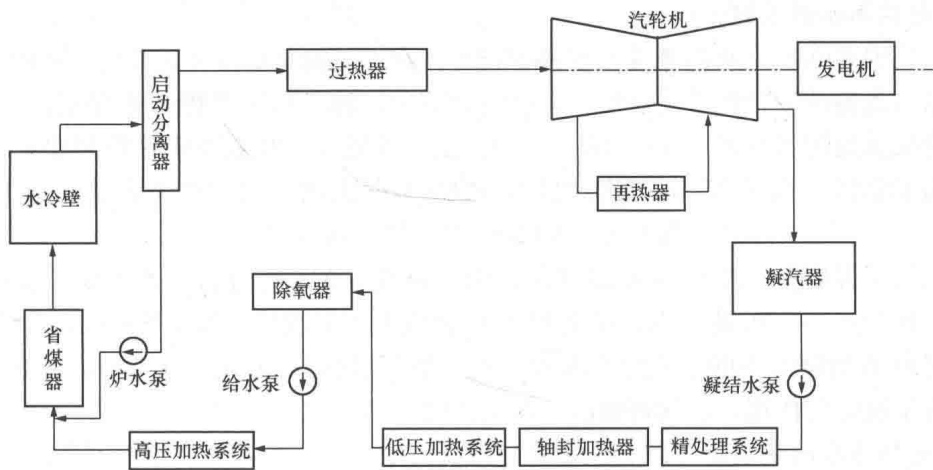


图 1-1 直流机组热力系统简化流程



二、火电厂水的作用

水作为一种热交换媒介，在火力发电过程中起着重要的能量转换作用。

水在锅炉受热面吸收热量，由液态变成气态，此时的水蒸气是具有高焓的介质，高速气流推动汽轮机转子旋转，汽轮机机械能通过发电机转换为电能，做功后的蒸汽在凝汽器凝结成液态的水。因此，水在热力发电中具有重要的吸收能量和释放能量并做功的作用，是热力发电必需的一种介质。

水既是传递能量的介质，又是一种化学反应的物质，水的品质直接影响与其直接接触金属材质的腐蚀、结垢和积盐情况，控制不好更有可能发生重大事故。

第二节 超临界水的性质和特性

一、超临界的概念和超超临界的划分

当温度和压力达到一定值时（374.3℃，22.05MPa），因高温而膨胀的水的密度和因高压而被压缩的水蒸气的密度正好相同时的状态，称作超临界点。此时，水的液体和气体没有区别，完全交融在一起，呈现一种新的高温高压状态下的流体。

温度和压力在超临界点以上的水为超临界水（Super Critical Water, SCW）。温度和压力在超临界点以下的水为亚临界水。进入超临界状态之后，水蒸气变成了热力学意义上的“气体”，在等压加热下，液体达到饱和温度后，直接变为蒸汽，不存在汽液两相区。进入超临界状态之后，蒸汽参数如何分档，目前还没有定论。多数国家把常规超临界参数的技术平台定在 24.2MPa/566℃/566℃（3500psi/1050°F/1050°F）上，把高于此参数（不论是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-Super Critical, USC）参数。

二、超临界水的性质

超超临界水的性质与超临界水相近，但与普通水有很大差异，水的性质（如水的氢键、水的密度、介电常数、黏性、热容、离子积和许多物质在超临界水中的溶解性等）在超临界状态下具有特殊性。

（一）超临界水的氢键

水的一些宏观性质与水的微观性质密切相关。水的氢键是最重要的性质，水的许多特殊性质是由水的氢键的键合性质决定的。超临界状态下，温度的升高能快速降低氢键的总数，同时稍微降低氢键的线性度。Gorbuty 等利用 IR 光谱研究了高温水中氢键与温度之间的关系，并得出了氢键度 X （水的氢键占总量的百分比）与温度 T 之间的关系式

$$X = (-8.68 \times 10^{-4})T + 0.851$$

该式描述了温度在 280~800K 温度范围内氢键度（ X ）的行为， X 表征了氢键对温度的依赖性。在 298~773K 范围内，温度和 X 的关系大致呈线性。在 298K 时，水的 X 值约为 0.55，意味着液体水中的氢键约为冰的一半。在 673K 时， X 值约为 0.3，氢键大部分都断裂了。由于氢键的作用，水具有极高的导热性能。

（二）超临界水的密度

水的许多性质都与水的密度有关。水在常温状态下的密度是 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，水在超临界状态下的密度是 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。在通常情况下，当温度和压力变化不大时，水的密度变化不大，但

是在较高的温度下，尤其是在超临界状态下，当压力变化几千帕时，水的密度变化很大。例如，在 400℃ 时，水的压力从 0.22kPa 变化到 25kPa 时，水的密度可由 0.1g/cm³ 变化到 0.84g/cm³。在超临界的临界点附近，压力的微小变化可以导致密度的巨大变化。

(三) 超临界水的离子积

在 25℃、0.1MPa 的条件下，水部分离解为 H₃O⁺ 和 OH⁻，其离子积为 $K_w = 10^{-14}$ 。通常水的离子积与密度密切相关，而与水的温度的直接关系不大。在温度和压力升高联合作用下，水的密度变大，导致水的离子积增大，即引起强的离解作用。例如，在 1000℃、密度为 1g/cm³ 的条件下，水的离子积 K_w 增大接近 10⁻⁶；而在 1000℃ 以上、密度为 2g/cm³ 的条件下，水则为高导电性离子流体，类似于熔融的盐。在超临界的温度和压力条件下，超临界水的离子积要比标准状态下水的离子积高出几个数量级。这种特性对高温超临界水的离解及其化学反应的影响非常重要。

(四) 超临界水的扩散系数和黏度

溶质在超临界水中的扩散速度会影响化学反应的速度，其扩散系数可以通过水的自由扩散系数进行估算。高温、高压水的扩散系数除与水的黏度有关外，还与水的密度有关。例如，在实际应用中，如果已知溶质的粒径和水的黏度，在水的密度足够高的条件下，可以用 Stoke 关系式来估算二元扩散系数，且溶质扩散系数与水的黏度成反比。在密度为 0.6~0.9g/cm³ 的条件下，温度为 400~600℃ 的超临界区域间，黏度对温度和密度的依赖性减小，超临界水的黏度仅为常态水的 1/10。超临界水的低黏度使超临界水分子和溶质分子具有较高的分子迁移率，溶质分子很容易在超临界水中扩散，从而使超临界水成为一种很好的反应媒介。

(五) 超临界水的介电常数和溶解度

静态介电常数控制着溶剂行为和盐的溶解度，是预测溶解性的重要的热力学性质之一，也是研究化学反应的重要参数。水在 25℃、0.1MPa 下的相对介电常数是 78.46，远高于大多数普通液体、有机物和氧等。介电常数与不同水分子间的电荷分布有关，也与本体积水的结构有关。在 600℃、24.6MPa 时，相对介电常数为 12（无极性），这时的超临界水类似于无极性的有机溶剂。根据相似相容原理，在临界温度以上，几乎全部有机物都能溶解，而无机物的溶解度则迅速降低，强电解质变成了弱电解质，相对介电常数降到 15 时，超临界水对电荷的屏蔽作用很低，水中溶解的溶质发生大规模的缔合作用。在 355~450℃ 温度区域内，有机物和无机物的溶解情况完全颠倒过来。

三、超超临界火电机组水的化学特性

水在超超临界状态下，无机盐的溶解度会降得很小，这一点需要引起高度重视。当机组在超超临界状态运行时，锅炉水中的无机盐类因溶解度的降低将更容易在水冷壁内表面积，从而引起水冷壁管的过热和腐蚀。因此，运行中的超超临界机组对水质的要求会更加严格。

水在超超临界状态下，可以与氧气、氮气等以任意比例混合，形成单一相。超临界水类似于非极性的有机溶剂，具有广泛的溶解能力，可以与油等物质混合，有机物和气体在水中具有较好的溶解性。这些有机物在有氧存在的超临界水中，更容易发生分解反应，反应产物主要是二氧化碳、氮气和小分子有机化合物，其产生的二氧化碳和低分子有机酸在水质控制不当时会发生酸性腐蚀。



因水在超临界状态下的电离度与标准状态不同，高温高压导致了水的电离度增大。例如，在 1000°C 、密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 的条件下，水的离子积 K_w 增大接近 10^{-6} ；而在 1000°C 以上、密度为 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 的条件下，水则为高导电性离子流体，类似于熔融的盐，具有了几乎无坚不摧的强腐蚀性。因此，超超临界机组对材料的选用除了考虑耐高温高压以外，还要考虑耐腐蚀性能。为了防止水的腐蚀，应选用合理的水化学处理方式。

超超临界状态下的蒸汽具有极强的氧化能力，有的物质能发生自燃，在水中冒出火焰（如 CH_4 、 C_2H_6 ）。超超临界机组的蒸汽温度参数提高到 $580\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，甚至提高到 650°C ，对金属材料提出了更高的要求，除了耐高温和耐高压指标外，还要充分考虑材料抗蒸汽氧化能力和抗氧化层剥落能力。高温蒸汽氧化是金属腐蚀的一种特殊形式，在超超临界的高温条件下，蒸汽对不锈钢表现为极强的氧化能力。在温度超过 570°C 的条件下，不锈钢的氧化速度逐渐加快，为 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$ ，金属的氧化速度有一个突变点。不锈钢在氧化过程中随着温度的升高，其氧化层会迅速增厚。当氧化层达到一定的厚度时，就会在运行条件变化时造成氧化皮脱落，容易造成管路堵塞、超温甚至爆管。

超超临界工况下的汽水理化特性决定了超超临界锅炉必须采用直流锅炉。直流锅炉因没有汽包，无法通过锅炉排污去除杂质，即所有可溶性给水污染物都会溶解在过热的输出蒸汽中，故它们应处于允许的汽轮机入口蒸汽纯度极限值的范围内。否则，无论是杂质沉积于锅炉热负荷很高的超临界锅炉的水冷壁管内，还是随蒸汽带入汽轮机沉积在超临界汽轮机叶片上，都将对机组的安全、经济运行产生很大的危害。为了确保超临界机组的安全运行，首先，必须确保锅炉有优良的给水水质，并调整超超临界机组至合适的水化学工况，降低超临界水对金属的腐蚀与结垢；其次，定期进行锅炉化学清洗以清除受热面的沉积物，从而提高机组经济运行水平。

第三节 超超临界机组的发展及水汽循环控制要求

一、超超临界机组的发展状况

多数国家、多数大发电公司及多数著名动力设备制造企业对于下列超超临界参数的概念比较认同，即当机组的主蒸汽参数至少满足下列条件之一时，即认为机组属于超超临界锅炉：

- (1) 主蒸汽压力大于等于 27MPa 。
- (2) 主蒸汽压力大于等于 24MPa ，且蒸汽温度大于等于 580°C （主蒸汽温度大于等于 580°C ，再热蒸汽温度大于等于 580°C ）。

超超临界机组技术始于 20 世纪 50 年代，以美国和德国为主的发达国家开始了对此技术的研究。

美国于 1957 年在俄亥俄州 Philo 电厂 6 号机组投运了世界上首台 125MW 超临界试验机组，在 20 世纪 60~70 年代投运了一大批超临界机组，到 1986 年共有 166 台机组投入运行，总功率达 110GW ，其中 800MW 以上的机组有 107 台， 1300MW 机组至今已有 9 台投入运行，蒸汽参数大多为 $24.1\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$ 。

德国是发展超超临界发电技术最早的国家之一，蒸汽参数一般为 $25\text{MPa}/545^{\circ}\text{C}/545^{\circ}\text{C}$ ，2003 年投产的 Niederaussen 电厂的机组功率为 965MW ，参数为 $26\text{MPa}/580^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ ，设计热效率为 44.5% 。

苏联自 1963 年投运第一台 300MW 超临界机组以来,到 1985 年已有 187 台超临界机组投入运行,总功率 68GW,单机功率有 300、500、800、1200MW 四种,蒸汽参数为 23.5MPa/540℃/540℃。

日本在火电机组的研发中注重机组效率,选择了一条引进、仿制、创新的技术发展道路。1967 年日立公司引进美国 B&W/GE 技术,在姊崎电厂投产第一台超临界机组,参数为 66kW、24.1MPa/538℃/566℃。1971 年,日本利用自己技术生产的 60 万 kW 机组投产,参数为 24.6MPa/538℃/566℃。到 1984 年,日本共有 73 台超临界机组投入运行,其中 600MW 机组 31 台,700MW 机组 9 台,1000MW 机组 5 台,蒸汽参数一般为 24.1MPa/538℃/566℃,在新增的火电机组中,约 80% 为超临界机组。日本投运的超临界机组蒸汽温度逐步由 538℃/566℃ 提高到 538℃/593℃、566℃/593℃ 及 600℃/600℃,蒸汽压力则保持 24~25MPa,容量以 1000MW 居多。参数为 31MPa/566℃/566℃/566℃ 的两台 700MW 二次再热的超超临界燃液化天然气的机组于 1989 年和 1990 年在川越电厂投入运行,机组净效率达 44%。目前日本正在研究参数为 31.4MPa/593℃/593℃/593℃,34.3MPa/649℃/593℃/593℃ 及 30MPa/630℃/630℃ 的机组,净效率将达到 44%~45%。

从超超临界机组的发展现状看,机组在 40 万~100 万 kW 的容量范围内的技术已日趋成熟。已投运的大容量(大于 70 万 kW)机组进汽压力均不大于 27.5MPa。丹麦十分重视超超临界机组的发展,在提高机组蒸汽参数的同时,利用低温海水冷却,大幅提高机组效率。丹麦的超超临界机组追求技术上的最高效率,倾向于采用二次再热技术,机组多数为 40 万 kW 供热机组,由于采用低温海水冷却循环,其循环效率可达 47%。1998 年投运的机组参数为 400MW、28.5MPa/580℃/580℃/580℃,机组效率高达 47%;2002 年开发了 53 万 kW、30.5MPa/582℃/600℃ 一次再热机组,其机组效率高达 49%,成为目前世界上热效率最高的火电机组。

我国从 20 世纪 80 年代后期起开始重视发展超临界火电机组。上海石洞口二厂引进的 2 台 600MW、24.2MPa/538℃/566℃ 超临界变压运行机组于 1991 年和 1992 年投入运行。从俄罗斯引进的 2×320MW (南京热电厂)、2×300MW (营口电厂)、2×500MW (天津盘山电厂)、2×500MW (内蒙古伊敏电厂)、2×800MW (辽宁绥中电厂) 的超临界机组已陆续投运。我国国产第一台 600MW 超临界机组于 2004 年 12 月在华能沁北电厂成功投运,锅炉供货方为东方锅炉厂,其技术支持方为日本 BHK 公司,锅炉为超临界参数变压直流本生型锅炉,采用一次再热、单炉膛、尾部双烟道结构。600MW 超临界机组与 600MW 亚临界机组相比,发电效率提高约 3%,发电煤耗降低 15g/(kW·h),以目前的煤价计算,一台 600MW 超临界机组一年可节约 2268 万元。华能玉环电厂是国内第一个开始建设的国产百万千瓦超超临界燃煤机组项目,为 4×1000MW 超超临界机组,工程于 2004 年 6 月开工建设,第一台机组于 2006 年 10 月成功投入运行,它是国内单机容量最大、参数最高、技术最为先进的百万千瓦超超临界电站锅炉。该机组商业运行半年后的现场测试表明:锅炉效率为 93.88%,汽轮机热耗为 7295.8kJ/(kW·h),额定负荷下机组的发电煤耗为 270.6g/(kW·h),氮氧化物排放为 270mg/m³,供电煤耗为 283.2g/(kW·h);机组热效率高达 45.4%,达到国际先进水平;二氧化硫排放浓度为 17.6mg/m³,优于发达国家排放控制指标,各项技术性能指标均达到了设计值。



二、超超临界机组的发展趋势

目前,世界各国都在大力发展高参数的超超临界机组。

1. 美国“760℃”计划

美国电力科学研究院为该项计划的技术牵头单位。计划的主要目标是在目前现有材料的基础上,通过技术改进,将超超临界机组的主蒸汽温度提高到760℃的水平,从而大大提高超超临界机组的效率,使电厂的效率达到52%~55%。计划的重点是确定哪些材料影响了燃煤机组的运行温度和效率;定义并实现能使锅炉运行于760℃的合金材料的生产、加工和镀层工艺;参与ASME的认证过程并积累数据为ASME规程批准的合金材料做好基础工作;确定影响运行温度为871℃的超超临界机组设计和运行的因素;与合金材料生产商、设备制造商和电力公司一起确定成本目标,并提高合金材料和生产工艺的商业化程度。

2. 欧洲“THERMIE”计划

欧洲各国约有40个单位参加了这个项目的工作,该项目从1998年开始,计划的重点内容是镍基合金材料的研究,700℃时蠕变强度大于100MPa;700~750℃条件下进行新材料试验,包括强度、蠕变特性、脆性、抗氧化性能等;锅炉和汽轮机的设计、循环优化;经济分析和评价进行40万kW和100万kW两种机型的设计,参数为700℃/720℃/720℃。此外,欧洲的“THERMIE”计划的主要目标是:使燃烧粉煤(PF)电厂的净效率由47%提高到55%(对于低的海水冷却水温度)或52%左右(对于内陆地区和冷却塔),降低燃煤电站的造价。

3. 日本超超临界机组研发计划

日本在通商产业省的支持下进行了超超临界机组研发计划。第一阶段的第一步使铁素体钢达到593℃,应用9%~12%Cr发展31.4MPa/593℃/593℃/593℃机组,发电效率达44.2%。第二步,奥氏体钢达到649℃,应用奥氏体钢发展34.3MPa/649℃/593℃/593℃机组,发电效率达44.9%。第二阶段,新型铁素体钢达到630℃,应用新型铁素体钢发展30MPa/630℃/630℃一次再热机组,发电效率达44.16%。目前,正开展650℃级所需的铁素体耐热钢研究。

我国通常把蒸汽压力高于27MPa的机组称为超超临界机组,超超临界机组发展重点侧重于材料研发方面,其目标是将主蒸汽温度的600~610℃平台,依次跃升到650~660℃、700~710℃、750~760℃三个台阶,并把初压力提高到35MPa以上,使汽轮机效率大幅提高。

三、超超临界机组水汽循环化学控制要求

近些年来,随着国家节能减排和环境保护的要求日趋严格,超超临界机组逐步发展为国内热力发电主流机组,研究超超临界机组的化学技术问题,进一步提高超超临界机组的安全运行水平,是一项十分迫切且具有现实意义的工作。

水在热力设备各系统中的相变过程与机组的工作过程相对应,例如,给水进入锅炉加热后变成蒸汽,流经过热器进一步加热后变成过热蒸汽,在冲转汽轮机后带动发电机发电,做功后蒸汽进入凝汽器被冷却成凝结水,经过低压加热器、除氧器、给水泵、高压加热器又回到锅炉中,完成一个完整的循环。在此循环过程中,水的品质决定着与之密切接触的锅炉炉管的工作状况(如结垢、积盐、腐蚀)与服役寿命,因此,高质量的补给水与给水热化学工况优化调节是机组经济、安全运行的重要保证。

在超临界水中，无机盐的溶解度会降得很小。当机组在超临界状态运行时，锅炉炉水中的无机盐因溶解度的降低更容易在水冷壁管内沉积，从而引起水冷壁管过热及垢下腐蚀。另外，在超临界状态下，超临界水类似非极性的有机溶剂，有机物和气体在水中有较好的溶解性，有机物在有氧存在的超临界水中快速分解，反应产物是二氧化碳、氮气及小分子有机化合物，分解产生的二氧化碳及低分子有机酸在水质控制不当时会发生酸性腐蚀。

因此，超超临界机组对水汽循环的化学要求非常严格，超超临界机组的化学调试和运行重点应做好以下几方面工作：

(1) 高质量地完成化学水处理设备各分系统的调试，确保化学水处理设备性能符合有关设计指标，为机组安全、稳定运行提供可靠的质量保证。

(2) 新建机组的化学清洗范围要求系统、全面，尽量扩大酸洗范围，确保金属内表面洁净。

(3) 新建超超临界直流机组清洗前、后的大流量水冲洗步骤不宜省略。

(4) 机组在启动前必须进行充分的冷态和热态化学冲洗，严格监督冷态冲洗和热态冲洗质量，冲转前充分利用高、低压旁路进行蒸汽系统的清洗，确保冲转蒸汽合格。

(5) 凝结水要求 100% 全流量经过凝结水精处理系统过滤除盐处理，减少各类杂质进入热力系统。控制凝结水混床离子的泄漏，减少系统盐类的腐蚀与沉积。

(6) 机组的化学运行指标符合给水 OT 处理要求时，尽快投用给水加氧处理系统，以降低流动加速腐蚀 (Flow Accelerated Corrosion, FAC) 对给水系统的腐蚀和减缓腐蚀产物在热力系统中的迁移沉积。

(7) 做好机组启动、停运、检修、停用保养等各阶段的化学监督工作，提高化学监督水平。