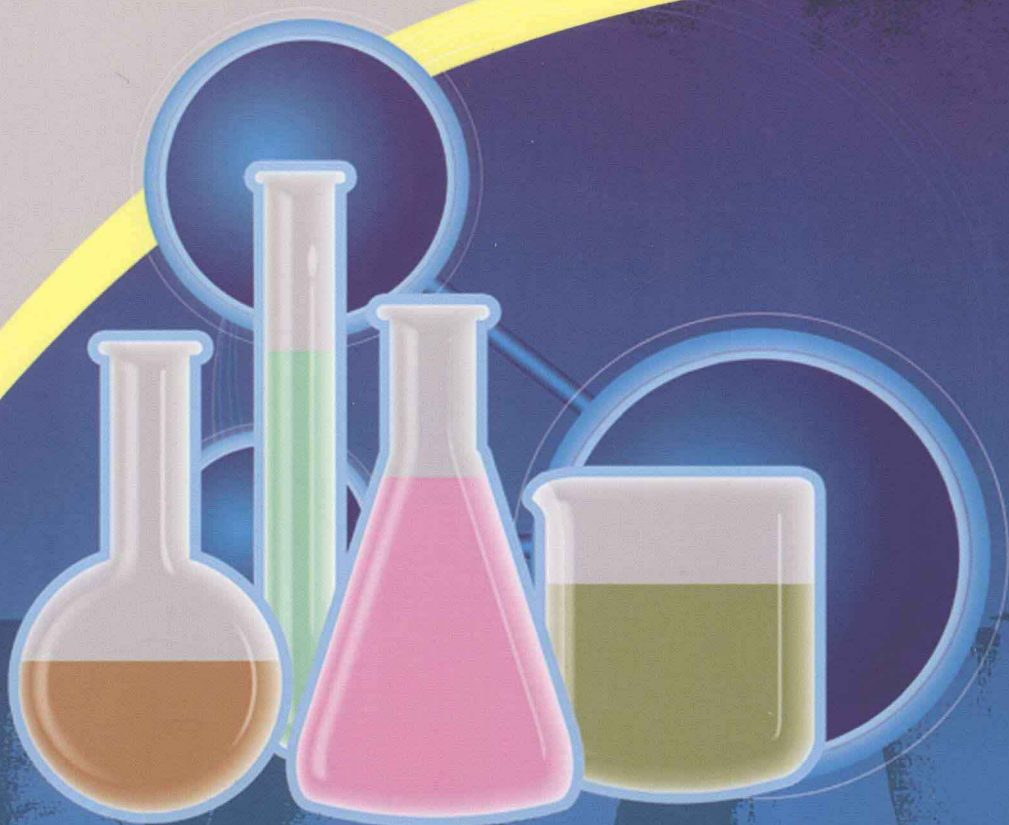


1000MW超超临界火电机组技术丛书

DIANCHANG HUAXUE

电厂化学

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

DIANCHANG HUAXUE

电厂化学

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,积累超超临界火电机组建设、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《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》。

本套丛书包括《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。本套丛书由广东电网公司电力科学研究院组织编写。本套丛书力求反映我国 1000MW 等级超超临界火电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《电厂化学》分册,全书共十二章,主要内容有超超临界火电机组的概述、原水预处理、离子交换除盐、膜处理技术、循环冷却水处理、凝结水精处理、发电机冷却水处理、氢气的制备与置换、汽水取样与加药、热力设备化学清洗、热力设备的腐蚀与防止、超超临界火电机组的化学监督。

本书可作为从事 1000MW 等级超超临界火电机组电厂化学专业安装调试、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,也可作为大专院校相关专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

电厂化学/广东电网公司电力科学研究院编. —北京:中国电力出版社, 2010. 12

(1000MW 超超临界火电机组技术丛书)

ISBN 978-7-5123-1037-7

I. ①电… II. ①广… III. ①电厂化学 IV. ①TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 214922 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>)

北京丰源印刷厂印刷

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 17 印张 412 千字

印数 0001—3000 册 定价 38.00 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 阙伟氏 陈世和 李 智
陈 迅 杨楚明 林清如

《电 厂 化 学》

编 写 人 员

主 编 卢国华
参 编 人 员 刘世念 付 强 马存仁 魏增福
范圣平 李 智

1000MW

超超临界火电机组技术丛书

电厂化学

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。

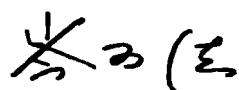
超超临界发电技术是一项先进、成熟、高效和洁净环保的发电技术，已经在许多国家得到了广泛应用，并取得了显著成效。目前，我国火电机组已进入大容量、高参数、系列化发展阶段，自主研发、开发的超超临界机组取得了可喜成绩并成为主要发展机型。因此，掌握世界一流发电技术，为筹建、在建和投运机组提供建设、管理、优化运行和检修经验，对于实现设计制造国产化、创建高水平节能环保火电厂、保证电力工业可持续健康发展，意义重大。

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



2010年8月

1000MW

超超临界火电机组技术丛书

电厂化学

前言

超超临界发电技术的发展至今已有近半个世纪的历史。经过几十年的不断发展和完善,超临界和超超临界火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,我国经济飞速发展,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,超临界和超超临界火电机组未来将成为我国电厂的主力机组。但是,超超临界发电技术在我国尚处于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、高参数的超超临界火电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,迫切需要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,为此,我们组织专家编写了《1000MW 超超临界火电机组技术丛书》。

本套丛书包括《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。本套丛书由广东电网公司电力科学研究院组织编写。本套丛书力求反映我国 1000MW 等级超超临界火电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,积累超超临界火电机组的建设、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。

本套丛书可作为从事 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,也可作为大专院校相关专业师生的参考教材。

本书为《电厂化学》分册,全书由卢国华主编,其中,第一、十二章由刘世念

编写，第二、三章由卢国华编写，第四、七章由魏增福编写，第五、六章由马存仁编写，第八、十一章由付强编写，第九、十章由范圣平编写；全书由卢国华和李智统稿。

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。

受编者水平和所收集的资料所限，书中疏漏之处在所难免，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
电厂化学

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 超超临界火电机组的基本特性.....	1
第二节 超超临界火电机组的汽水品质特性.....	4
第三节 超超临界火电机组的汽水控制及汽水质量标准.....	5
第二章 原水预处理	8
第一节 混凝处理技术.....	8
第二节 沉淀处理技术	13
第三节 过滤处理技术	16
第三章 离子交换除盐	27
第一节 离子交换树脂	27
第二节 离子交换理论	38
第三节 离子交换除盐设备	41
第四章 膜处理技术	51
第一节 超滤	52
第二节 反渗透膜技术	60
第三节 EDI 除盐技术	72
第五章 循环冷却水处理	78
第一节 发电厂冷却水处理系统概述	78
第二节 循环冷却水中水垢形成的机理	87
第三节 循环冷却水的稳定处理	93
第四节 循环冷却水系统中微生物的控制	97
第五节 凝汽器管材的腐蚀和防止.....	107

第六章 凝结水精处理	123
第一节 凝结水精处理系统概述.....	123
第二节 凝结水精处理系统的设备.....	124
第三节 凝结水精处理系统的运行.....	136
第四节 凝结水精处理的再生系统.....	139
第五节 凝结水精处理系统常见故障及处理.....	146
第七章 发电机冷却水处理	148
第一节 发电机内冷水腐蚀理论.....	148
第二节 发电机内冷水腐蚀影响因素.....	149
第三节 发电机内冷水处理方法.....	151
第四节 发电机内冷水运行监督.....	154
第八章 氢气的制备与置换	156
第一节 氢气的性质.....	156
第二节 发电厂制氢系统.....	162
第三节 制氢原理.....	170
第四节 制氢设备的运行与维护.....	175
第五节 发电机气体置换和充氢.....	178
第六节 氢气运行监督及试验方法.....	179
第七节 制氢站安全管理要求.....	183
第九章 汽水取样与加药	186
第一节 汽水取样系统.....	186
第二节 直流锅炉化学加药系统.....	189
第十章 热力设备化学清洗	199
第一节 热力设备化学清洗的必要性.....	199
第二节 热力设备化学清洗原理.....	200
第三节 化学清洗工艺的确定.....	205
第四节 化学清洗工艺过程.....	207
第五节 化学清洗中的质量监督.....	210
第十一章 热力设备的腐蚀与防止	213
第一节 热力设备运行时的氧腐蚀及防止.....	213
第二节 热力设备的停用腐蚀与停用保护.....	218
第三节 热力设备的酸腐蚀和碱腐蚀及防止.....	223

第四节 热力设备的应力腐蚀及防止.....	232
第十二章 超超临界火电机组的化学监督.....	237
第一节 超超临界直流锅炉给水处理.....	237
第二节 超超临界火电机组热力设备腐蚀.....	243
第三节 超超临界火电机组蒸汽系统积盐.....	253
参考文献.....	259

概 述

为了提高火电机组的经济性，机组朝高参数、大容量方向发展已成为必然趋势。大容量、超临界火电机组因其能量利用率高、经济性好而得到迅速发展，已经在世界发达国家广泛应用，并向超超临界火电机组发展。随着我国国民经济的快速发展，超超临界火电机组在国内也开始大量应用。

超超临界火电机组与超临界、亚临界火电机组相比，不仅具有更高的热效率，而且具有良好的运行灵活性和负荷适应性，显示出显著节能和改善环境的双重功效，作为世界上先进的洁净煤发电技术主导着电力的发展方向。

我国的超超临界火电机组的设计和制造，尚在起步阶段，目前已有一批国产化超超临界火电机组相继投产或正在兴建。随着电力事业的发展，1000MW超超临界火电机组将在我国迅速发展。高效、环保、节能的超超临界火电机组将成为我国燃煤火力发电的主力机组。国外在发展超超临界发电技术方面已经走过了近半个世纪的历程，积累了很多成功和失败的经验。国外超超临界火电机组运行经验证明，解决好材料和化学两个专业方面的问题，是保证超超临界火电机组设计和运行成功的关键。

第一节 超超临界火电机组的基本特性

一、超超临界的定义

锅炉按照蒸汽参数分为低压锅炉（出口蒸汽压力 $\leq 2.45\text{MPa}$ ）、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（ $\geq 22.1\text{MPa}$ ）和超超临界压力锅炉（ $\geq 24.2\sim 27\text{MPa}$ ）。

汽轮机的参数传统上都是以压力高低来分划的，如低压（ 1.27MPa ）、中压（ 3.43MPa ）、高压（ 8.83MPa ）、亚临界压力（ 16.67MPa ）。如果是非再热机组，初温与初压要求匹配，使排汽湿度控制在允许的范围内，如 535°C 对应 8.83MPa 。再热机组则无此要求，只要材料性能允许，初温越高越好。

进入超临界压力（ $\geq 22.12\text{MPa}$ ）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（SuperCritical, SC）之后，蒸汽参数如何分档，目前还没有定论，但多数国家把常规超临界参数的技术平台定在 $24.2\text{MPa}/566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ （ $3500\text{psig}/1050^\circ\text{F}/1050^\circ\text{F}$ ）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, USC) 参数。我国将此参数称为“高效超临界”参数,但从术语规范化及与国际接轨方面而言,宜采用“超超临界”。

二、超超临界火电机组的技术参数

超超临界火电机组是指过热器出口主蒸汽压力超过 22.129MPa 的机组。目前运行的超超临界火电机组运行压力均为 24~25MPa,理论上,在水的状态参数达到临界点时的压力 (22.129MPa) 和温度 (374.15℃) 时,水完全汽化会在一瞬间完成,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,两者的参数不再有区别。由于在临界参数下,汽、水密度相等,因此在超超临界压力下无法维持自然循环,即不能采用汽包锅炉,而直流锅炉成为唯一形式。

提高蒸汽参数与发展大容量机组相结合是提高常规火电厂效率及降低单位容量造价最有效的途径。与同容量亚临界火电机组的热效率相比,理论上采用超临界参数,效率可提高 2%~2.5%;采用超超临界参数,效率可提高 4%~5%。目前,世界上先进的超临界火电机组效率已达 47%~49%。

三、超超临界火电机组的运行可靠性

目前,先进的大容量超临界火电机组具有良好的启动、运行和调峰性能,能够满足电网负荷的调峰要求,并可在较大的负荷范围 (30%~100% 额定负荷) 内变压运行,变负荷速率多为 5%/min。美国《发电可用率数据系统》1980 年的分析报告中公布了 71 台超临界火电机组和 27 台亚临界火电机组的运行统计数据,统计数据表明,这两类机组的年均运行可用率、等效可用率和强迫停运率已无差别。据美国 EPRI 统计,容量为 600~835MW、只有二次中间再热的超临界火电机组整机可用率已达 90%,1300MW 二次中间再热的燃煤超临界火电机组可用率为 92.3%,有的还要高一些;有 1 台 ABB 公司制造的 1300MW 超临界火电机组甚至创造过安全运行 605 天的纪录。同时,从国外引进的几台超临界火电机组和引进技术生产的超 (超) 临界火电机组的运行情况看,也说明这一点,即目前投运的超临界火电机组的运行可靠性指标已经不低于亚临界火电机组,有的甚至更高。

四、超超临界火电机组的投资造价比较

提高蒸汽参数将使机组的初投资有所增加,这是因为压力提高使很多设备和主蒸汽管道的壁厚要相应增加,或者说要选用性能和价格更高一些的材料;而温度提高后,则要使用更多价格昂贵的合金钢材。一般认为,超临界火电机组的造价比亚临界火电机组增加 3%~10%;但由于世界各国的具体情况不同,且每个电站的设计和辅机配套方案等也有所不同,因此,造价增加的幅度也不同。

因为电厂的运行成本主要取决于燃料成本,而超临界火电机组的效率,可抵偿一些造价略高的影响,所以运行成本有可能比亚临界压力电厂低。许多专家认为,若煤价超过 30 美元/t,就应当采用超临界火电机组,但煤价较低的地区仍采用亚临界火电机组较为合适。此外,在进行不同方案的综合技术经济比较和分析时,可能还有其他一些因素值得考虑,如污染排放收费的情况、电站所处地理位置、电网的负荷率、上网电价以及环保因素等。

五、超超临界火电机组锅炉水冷壁管圈形式

传统观念认为,只有螺旋管圈水冷壁才能满足超超临界火电机组锅炉全炉膛变压运行的要求,但是目前欧洲的超超临界火电机组锅炉仍然采用下炉膛螺旋管圈、上炉膛垂直管圈的

传统设计。这种水冷壁系统的优点是，可以采用较大口径内光管水冷壁管；可以有效地补偿沿炉膛断面上的热偏差；不需要根据热负荷分布进行平行管系统复杂的流量分配；在低负荷下仍能保持平行管系统流动的稳定性。

螺旋管圈水冷壁的缺点是结构复杂、流动阻力大和现场安装工作量大。因此，日本三菱公司在亚临界压力控制循环锅炉设计制造经验基础上，开发出了一次上升垂直管圈水冷壁变压运行超临界压力锅炉，其特点是，采用内螺纹管来防止变压运行至亚临界区域时，水冷壁系统中发生膜态沸腾和在水冷壁管入口处设置节流圈使管内流量与吸热量相适应。截至2000年，日本已有7台垂直管圈水冷壁高效超临界压力锅炉在运行。

六、超超临界火电机组锅炉承压部件材质的选择

超超临界火电机组锅炉承压部件用钢主要有奥氏体钢和铁素体钢两类。奥氏体钢热强度高，但导热性差、膨胀系数大、抗应力腐蚀能力低、工艺性能差，且成本高。因此，设计时应少用奥氏体钢，多用新开发的铁素体钢和改进的奥氏体钢。根据制造特别是安装的要求，锅炉水冷壁必须由无需焊后热处理的材料制成，现代超临界压力锅炉水冷壁通常采用的钢种为T22/MCrMo44。采用这种材料制作水冷壁，其最高许用温度为460~470℃；对于高效超临界压力锅炉，当主蒸汽参数为28MPa/580℃/580℃时，水冷壁采用这种材料还是可行的。

低合金Cr-Mo钢的不足之处是高温蠕变断裂强度低，用这种材料制作管道，随着参数的提高，管壁厚度相应增加，从而提高了成本和工艺复杂性，同时降低了运行灵活性。日本新研制的H¹CM12A钢不仅具有优于常规低铬铁素体钢的高温蠕变强度，而且具有优于2.25Cr-Mo钢的可焊性，同时不需要焊前预热和焊后热处理。

H¹CM12A钢已获得ASME规范的认可，列为SA213-T23 II钢，可替代T22钢，适用于更高的蒸汽参数。当前，过热器、再热器出口联箱及其连接管道，采用P22/20Cr-1MoV121钢制作，在合理的壁厚和管径范围内，其极限许用温度略高于550℃。若采用改良的9%Cr钢P91制作联箱，其极限许用温度可超过580℃。用P91替代P22，尽管其焊接性能不如P22，但壁厚可减薄50%以上，经济效益十分可观。对P91进一步改进，新一代9%~12%Cr钢高温蠕变断裂强度已经进入奥氏体钢的温度范围，在600℃的蒸汽温度条件下，用此钢制作联箱壁厚可比用P91制作的联箱壁厚减薄40%，如E91、II F616和H¹CM12A等。过热器、再热器管束，在600℃/600℃的蒸汽温度条件下，最高壁温达650~670℃，因此选用奥氏体钢是十分必要的，如TP347TH、TP347HFG、Super 340H等；部分高温段采用20-25Cr系的奥氏体钢，如HR3C、II F709、TempaloyA-3。这种材料有足够的高温蠕变断裂强度，且由于含Cr量高，能很好地抗高温腐蚀。

七、超临界火电机组的启动特点

超临界压力锅炉与亚临界压力自然循环锅炉的结构和工作原理不同，启动方法也有较大差异。超临界压力锅炉与亚临界压力自然循环锅炉相比，有以下启动特点：

1. 设置专门的启动旁路系统

超临界压力锅炉的启动特点是在锅炉点火前就必须不间断地向锅炉进水，建立足够的启动流量，以保证给水连续不断地强制流经受热面，使其得到冷却。

一般高参数大容量的超临界压力锅炉采用单元制系统。在单元制系统启动中，汽轮机要求暖机、冲转的蒸汽在相应的蒸汽压力下具有50℃以上的过热度，目的是防止低温蒸汽送入汽轮机后造成汽轮机的水冲击。因此，超临界压力锅炉需要设置专门的启动旁路系统来排

除这些不合格的工质。

2. 配置汽水分离器和疏水回收系统

超临界火电机组运行在正常范围内，锅炉给水靠给水泵压头直接流过省煤器、水冷壁和过热器。锅炉给水直流运行状态的负荷范围：锅炉满负荷到直流量小负荷，直流量小负荷一般为 25%~45%。低于该直流量小负荷，为了保持给水流量稳定，应配置汽水分离器和疏水回收系统。例如，在 20% 负荷时，最小流量为 30%，意味着在水冷壁出口有 20% 的饱和蒸汽和 10% 的饱和水，这种汽水混合物必须在水冷壁出口处分离，干饱和蒸汽被送入过热器。因此在低负荷时，超超临界压力锅炉需要汽水分离器和疏水回收系统。疏水回收系统是超超临界压力锅炉在低负荷时必须具备的系统，其作用是使锅炉安全可靠地启动及使其热损失最小。

3. 启动前锅炉要建立启动压力和启动流量

启动压力是指直流锅炉在启动过程中水冷壁中工质具有的压力。启动压力升高，汽水体积差减小，锅炉水动力特性稳定，工质膨胀小，并且易于控制膨胀过程；但启动压力越高，对屏式过热器和再热过热器的保护能力越低。启动流量是指直流锅炉启动过程中锅炉的给水流量。

八、超超临界火电机组汽水分离器的控制方式

超超临界火电机组具有外置式汽水分离器和内置式汽水分离器。我国很少采用外置式汽水分离器。内置式汽水分离器在湿态和干态的控制作用是不同的，而且随着压力的升高，湿、干态的转换是内置式汽水分离器的一个显著特点。

1. 内置式汽水分离器的湿态运行

如前所述，锅炉负荷小于 35% 时，超超临界压力锅炉处于最小水冷壁流量状态，所产生的蒸汽要小于最小水冷壁流量，此时汽水分离器为湿态运行，汽水分离器中多余的饱和水通过汽水分离器液位控制系统排出。

2. 内置式汽水分离器的干态运行

当锅炉负荷大于 35% 以上时，锅炉产生的蒸汽等于或大于最小水冷壁流量，过热蒸汽通过汽水分离器，此时汽水分离器为干态运行，汽水分离器出口温度由水煤比控制，即由汽水分离器湿态时的液位控制转为温度控制。

3. 汽水分离器湿、干态运行转换

在湿态运行过程中，锅炉的控制参数是汽水分离器水位维持启动给水流量。在干态运行过程中，锅炉的控制参数是温度和水煤比。在湿、干态转换过程中，锅炉可能会发生蒸汽温度的变化，因此在此转换过程中必须保证蒸汽温度的控制。

第二节 超超临界火电机组的汽水品质特性

一、超超临界条件下蒸汽的物理特性

在超超临界参数下，汽水工质在管子内壁面附近的流体黏度、比热容、热导率和比体积等参数发生了显著变化，可能引起水冷壁管内发生类膜态沸腾，水中的盐类等杂质在受热面浓缩。工质的黏度、密度、热导率等物理参数随压力和温度而变化，但受压力的影响较小，而受温度的影响较大。在 250~550℃ 的范围内，工质密度和动力黏度随温度变化最大；当

工质温度在 300~400℃ 范围内时, 管内壁面处的工质黏度约为管中心工质黏度的 1/3, 由此产生黏度梯度, 引起流体边界层的层流化。因此, 在管子热负荷较大时就可能导致传热恶化, 同时由于盐类等杂质的浓缩, 受热面结垢, 进一步加剧传热恶化。

水冷壁中工质大比热容特性将随压力的升高而减弱, 对应压力的大比热容值减小, 也可能发生类膜态沸腾引起的传热恶化。

二、在超超临界条件下蒸汽中的溶解与沉积特性

在超超临界条件下, 蒸汽已具备和水一样的溶解特性。各种盐、酸、碱和金属腐蚀产物等物质在蒸汽中的溶解度随蒸汽压力的不同, 可以从微克升级变化到毫克升级。压力越高, 蒸汽的溶解携带能力越强。过热蒸汽的溶解度随压力降低或比体积的增加而迅速地降低, 随着蒸汽做功膨胀, 蒸汽的溶解能力下降, 在高参数下蒸汽溶解携带的物质就会随着蒸汽的转移而不断析出, 沉积在后续设备的不同部位, 由此会加剧机组蒸汽通流部分潜在的金属腐蚀问题。因此, 超超临界火电机组的水质控制应该比超临界火电机组更为严格。

三、超超临界条件下蒸汽的高温氧化特性

超超临界火电机组的温度参数提高到 580~600℃, 甚至提高到 650℃, 对金属材料提出了更高的要求, 除了高温强度指标外, 还应充分考虑材料的抗水蒸气氧化能力和抗氧化层剥落能力。众所周知, 高温水汽氧化是金属腐蚀的一种特殊形式。在高温条件下, 因为氢质子的影响, 水蒸气对不锈钢材料表现为较强的氧化作用。在温度超过 570℃ 的条件下, 不锈钢氧化的速度逐渐加快, 在 600~620℃ 之间, 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。当氧化层达到一定厚度时, 就会在运行条件变化时剥落, 成为氧化皮, 造成管路堵塞, 从而引起管路短期过热甚至爆管事故。

第三节 超超临界火电机组的汽水控制及汽水质量标准

一、超超临界火电机组的汽水控制

1. 机组汽水品质控制

水临界状态的压力为 22.129MPa, 温度为 374.15℃。超超临界压力工况时, 汽、水的密度差消失, 无法进行汽水分离。超超临界工况下, 汽、水的理化特性决定了超超临界压力锅炉必须采用直流锅炉。直流锅炉的工作过程是依靠给水泵的压头将给水一次通过预热、蒸发、过热而变成过热蒸汽。在直流锅炉蒸发受热面中, 工质的流动不是依靠汽、水密度差来推动的, 而是通过给水泵压头来实现的。

1000MW 超超临界压力锅炉的典型汽水流程是: 给水→省煤器→螺旋水冷壁→垂直水冷壁→汽水分离器→顶棚和包覆过热器→低温过热器→屏式过热器→高温过热器→集汽联箱。因为水一次通过受热面变成蒸汽, 所以直流锅炉的蒸发量等于给水流量。

直流锅炉的特点决定了由给水带入的杂质在机组的热力系统中只有如下三个去处:

- (1) 部分溶解于过热蒸汽中, 其中绝大部分随蒸汽带入汽轮机而沉积在汽轮机上。
- (2) 不能溶解于过热蒸汽中的那部分杂质将沉积在锅炉的炉管中。
- (3) 极少量的杂质溶解于凝结水中而进入下一个汽水循环。

无论杂质沉积在锅炉热负荷很高的锅炉的水冷壁管内, 还是随蒸汽带入汽轮机沉积在汽轮机上, 都将对机组的安全性和经济性运行造成很大危害。因此, 尽量纯化水质、减少水中

盐类杂质、降低给水中的含铁量、控制腐蚀产物的沉积量是超超临界火电机组水处理和水质控制的主要目标。

2. 超超临界工况下的水化学特点

通常由给水带入锅炉内的杂质主要是钙离子、镁离子、钠离子、硅酸化合物、强酸阴离子和金属腐蚀产物等，各种杂质离子在过热蒸汽中的溶解度是有很大差别的，且随蒸汽压力的增加，变化的情况也不同。给水中的钙、镁离子在过热蒸汽中的溶解度较低，随压力的增加，溶解度变化不大；钠化合物在过热蒸汽中的溶解度较大，随压力的增加，溶解度稳步增加；硅化合物在亚临界以上工况下的溶解度已接近同压力下的水中的溶解度，随压力的增加，溶解度也渐渐增加；强酸阴离子（如氯离子）在过热蒸汽中的溶解度较低，随压力的增加变化较大；硫酸根离子在过热蒸汽中的溶解度较低，随压力的增加，溶解度变化不大；铁氧化物在蒸汽中的溶解度随压力的升高也呈不断升高趋势，而铜氧化物在过热蒸汽中的溶解度随着压力的增加而不断增加，当过热蒸汽压力大于 17MPa 以上时，铜在过热蒸汽中的溶解度发生突跃性增加。铜会在汽轮机通流部分沉积，使通流面积减少，影响汽轮机的出力，所以应对超超临界火电机组凝结水和给水中铜的含量充分重视。建议最好采用无铜系统，并严格控制凝结水、给水系统运行中的 pH 值，减少腐蚀产物的产生。

3. 超临界和超超临界火电机组的结垢、结盐特点

超超临界工况下，当锅炉给水水质不纯时，由给水带入的钙离子、镁离子、部分铁氧化物将沉积在水冷壁管上而影响锅炉的安全运行。绝大部分的钠化合物、硅化合物、强酸阴离子、铜氧化物和部分铁氧化物将溶解于过热蒸汽中被带入汽轮机。随着过热蒸汽在汽轮机中做功后蒸汽压力和温度的下降，杂质在蒸汽中的溶解度也会不断下降，原溶解于过热蒸汽中的铜氧化物和铁氧化物及部分钠化合物就会沉积在汽轮机高压缸的通流部位，硅化合物和部分钠化合物就会沉积在汽轮机低压缸的通流部位而影响汽轮机的效率。部分强酸阴离子可能会随阳离子沉积在汽轮机叶片上，而不沉积在汽轮机叶片上的部分强酸阴离子就有可能溶解在汽轮机低压缸的初凝结区的液滴内，对该部位的叶片及金属部件产生应力腐蚀、点蚀或产生腐蚀疲劳裂纹。在上述沉积物中，最常见的是 Na_2SO_4 和 NaOH 。这类物质溶解在蒸汽中后，会对后续的过热器、再热器及汽轮机产生腐蚀影响。

二、超超临界火电机组的汽水质量标准

根据各种离子在汽水中的溶解度的变化情况和在不同部位沉积的可能性，由于超临界和超超临界工况下过热蒸汽中的铜、铁氧化物的溶解度与亚临界工况相比，有较大的提高，尤其是铜氧化物的溶解度从亚临界工况到超临界、超超临界工况有一个急剧的提高，如锅炉给水水质不加以严格控制，将会造成大量铜铁氧化物沉积在汽轮机高压缸的通流部位。为了保证机组的安全运行，在对锅炉给水水质的要求上，铜、铁氧化物的标准将比亚临界、超临界压力直流锅炉有更高的要求。另外，由于超超临界火电机组中奥氏体钢的使用量比亚临界火电机组有较大的提高，且与相同再热蒸汽温度的亚临界火电机组相比，低压缸末几级叶片的湿度增加，因此，为了防止发生奥氏体钢的晶间腐蚀和汽轮机末几级叶片的腐蚀，对阴离子的含量也提出了较高的要求。

此外，为了消除钠盐的沉积、腐蚀对过热器、再热器及汽轮机产生的影响，必须控制蒸汽中的钠含量小于 $1\mu\text{g}/\text{kg}$ ，控制二级再热器中形成的氢氧化钠浓缩液对奥氏体钢的腐蚀和锅炉停用时存在干状态的 Na_2SO_4 引起再热器的腐蚀。要想控制蒸汽中的钠含量小于 $1\mu\text{g}/$