



朱志平 主编

# 电厂化学概论

A General Introduction of  
Power Plant Chemistry



化学工业出版社

本书可作为高等院校化学工程及工艺专业、环境工程、能源工程、材料工程、冶金工程、轻工工程、生物工程、制药工程、食品工程等专业的教材，也可供从事上述工作的工程技术人员参考。本书可作为高等院校化学工程及工艺专业、环境工程、能源工程、材料工程、冶金工程、轻工工程、生物工程、制药工程、食品工程等专业的教材，也可供从事上述工作的工程技术人员参考。

# 电厂化学概论

朱志平 主编

图书在版编目(CIP)数据  
 电厂化学概论/朱志平主编. —北京:化学工业出版社, 2013.1  
 ISBN 978-7-122-15839-8  
 I. ①朱... II. ①朱... III. ①TM631.8  
 中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第188888号

责任编辑: 刘丽宏  
 责任校对: 周安华

出版发行: 化学工业出版社  
 社址: 北京永福寺大街  
 邮编: 100037  
 电话: 010-64889533  
 网址: www.cip.com.cn

87mm×165mm 1/16 32页 288字 2013年3月北京第1版第1次印刷

化学工业出版社  
 北京

如有质量问题, 本社负责退换, 恕不退货。

本书从锅炉用水的净化处理、锅炉水化学工况及调节优化、热力系统的结垢与积盐特性、热力设备的腐蚀与防护技术、机组水汽系统化学监督技术、电力用油(气)、电力用煤、节水技术等方面详细介绍了电厂化学的工作内容,同时阐明了火电厂热力系统及超临界机组发展趋势。

本书可作为火力发电机组运行人员、电厂化学研究人员和管理人员,以及高等院校相关专业师生的参考书籍。

# 电厂化学

主编 朱志平

## 图书在版编目(CIP)数据

电厂化学概论/朱志平主编. —北京:化学工业出版社, 2013.1

ISBN 978-7-122-15839-0

I. ①电… II. ①朱… III. ①火电厂-电厂化学-概论  
IV. ①TM621.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第267015号

责任编辑:刘丽宏

文字编辑:孙凤英

责任校对:周梦华

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张21½ 字数559千字 2013年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

# 编写人员名单

主 编 朱志平

编 者(按姓氏笔画)

孙本达 孙墨杰 李小江 李茂东 朱志平  
杨宝红 吴春华 周 青 柯于进 郝丽娟  
黄云光

编写分工如下

第一章	郝丽娟	东北电力大学
	孙墨杰	东北电力大学
第二章	吴春华	上海电力学院
第三章	李茂东	广州市特种承压设备检测研究院
第四章	孙本达	西安热工研究院
第五章	朱志平	长沙理工大学
第六章	柯于进	西安热工研究院
第七章	黄云光	广西电网公司电力科学研究院
第八章	周 青	四川电力科学研究院
	李小江	华电电力科学研究院
第九章	杨宝红	西安热工研究院

# 前言

## FOREWORD

电厂化学属于应用化学的一个分支，是一门与火力发电生产过程密切相关，专门研究水、汽、油、燃料（及与之接触金属）的性能、特性、规律的科学。它涉及水化学、蒸汽化学、水处理工艺学、金属腐蚀科学、油品化学、燃料化学、有机化学、分析化学等学科；主要研究对象有工作介质（水、蒸汽），冷却介质（水、矿物油、氢气），绝缘介质（矿物油、六氟化硫、空气、绝缘纸），润滑介质（矿物油），传动介质（矿物油、抗燃油）以及化学药剂（水处理剂、停备用保养剂、各种化学添加剂）等；研究目的在于防止热力设备的结垢、积盐和腐蚀，防止充油设备油（气）质的老化，改善锅炉燃烧工况，节约燃料，为发供电设备的安全经济运行提供保障；具体工作内容包括锅炉水处理技术（含膜分离技术）、锅炉水化学工况（含给水处理）、热力设备腐蚀与防护、发电机内冷水处理、凝结水精处理、水汽系统化学监督、氢气制取及监督、油质分析及监督、六氟化硫分析及监督、燃料分析及监督等。

在电力生产安全事故中，由于腐蚀、结垢而造成的破坏事故占相当的比例。据资料统计，近 20 年中我国共记录了 40533 次锅炉管子损坏事故，其中 80% 的炉管故障造成了电厂的事故停机。锅炉管子损坏事故中有 40% 发生在水冷壁管，30% 发生在过热器，15% 为再热器，10% 为省煤器，5% 为旋风燃烧器，而其中“四管”问题主要与腐蚀、结垢相关。随着超（超）临界机组的不断投产（截至 2012 年 6 月 24 日，全国已经投运的 1000MW 超超临界机组 49 台，600MW 超临界机组近 300 台），一方面机组材质对水汽运行工况的敏感度提高，对水汽品质的要求越来越高（大部分杂质的控制水平处于仪器的检测限）；另一方面，随着压力的增加，水汽中杂质的溶解与携带量大幅增加，如钠化合物、硅化合物在过热蒸汽中的溶解度随压力的增加而稳步增加，铁氧化物在蒸汽中的溶解度随压力的升高也不断升高，铜氧化物在蒸汽中的溶解度随压力的升高而增加，当压力升高到一定程度时有发生突跃性增加的情况。对多台 1000MW 机组大修检查表明，机组腐蚀、结垢、积盐的状况普遍存在，这说明电厂化学有待加强与重视，也说明电厂化学的重要性不可替代。

美国电力研究院（EPRI）给出的电厂化学工作内容包括以下几点。

- ① 制定水化学导则，如化学清洗导则、启动运行导则、补给水与凝结水精处理导则、腐蚀与沉积控制导则、发电机定子内冷水处理导则等。
- ② 探讨汽轮机部件、锅炉与余热锅炉炉管、给水加热器管与冷却器管损坏的理论与实践，消除与水化学有关的锅炉管故障。
- ③ 研究腐蚀机理与控制导则，如流动加速腐蚀、铜（混合金属）腐蚀、蒸汽汽轮机腐蚀、锅炉与余热锅炉炉管腐蚀等。
- ④ 研究防止锅炉炉管沉积的原理与方法。
- ⑤ 蒸汽化学研究，包括盐类携带与分配及在汽轮机中的行为特性。
- ⑥ 氧化物生长特性研究，包括氧化物剥离导则与水冷壁管上氧化物特性的研究。
- ⑦ 电厂化学监测仪表研究，包括取样、分析及数据处理，水汽实时监测仪表、腐蚀与

腐蚀产物迁移监测仪表、空气泄漏量监测仪表的研究。

⑧ 凝结水精处理及前置过滤研究。

⑨ 发电机定子内冷水腐蚀与沉积物控制。

⑩ 电厂水化学项目研究，如降低炉管故障项目、水化学改进项目及项目评估费用的研究等。

上述内容的实质就是减少机组的腐蚀、结垢、积盐问题。因此，研究火电机组的电厂化学技术问题，提高机组的运行与安全水平，是十分迫切的、具有现实意义的工作。

全书分九章，由西安热工研究院、华电电力科学研究院、长沙理工大学、东北电力大学、上海电力学院、广州市特种承压设备检测研究院、四川电力科学研究院、广西电网公司电力科学研究院的有关专家共同编写而成。全书由长沙理工大学的朱志平负责统稿。郭小翠、谭铮辉、付晶、曾彬、黄静、陆海伟、王磊静、焦小翠等在资料校对、编排中进行了大量工作，在此表示衷心感谢！

感谢我国著名电厂化学专家许崇武教授百忙之中审阅大纲及对本书编写工作的指导，在新书出版之际，敬祝许教授健康长寿！

本书适合火力发电机组运行人员、电厂化学研究人员及管理人员工作参考，也可供高等院校相关专业师生参阅。因水平有限，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

# 目录

## CONTENTS

<b>第一章 电厂化学概述</b> .....	<b>1</b>
第一节 热力系统 .....	1
一、电厂热力系统 .....	1
二、电厂金属材料 .....	2
三、超临界机组发展概况 .....	3
第二节 电厂化学工作内容与任务 .....	4
一、电厂水汽系统及其杂质来源 .....	4
<b>第二章 锅炉用水的净化处理</b> .....	<b>11</b>
第一节 天然水水质特性 .....	11
一、天然水物理特性 .....	11
二、天然水化学特性 .....	11
第二节 锅炉补给水的预处理 .....	11
一、混凝澄清处理 .....	12
二、过滤处理 .....	16
三、吸附处理 .....	19
四、预处理设备的运行、维护与检修 .....	21
第三节 锅炉补给水的化学除盐 .....	26
一、离子交换树脂的物理性能 .....	26
二、离子交换树脂的化学性能 .....	28
三、离子交换树脂的除盐过程 .....	30
四、离子交换设备的类型与工艺 .....	32
五、离子交换设备的运行、维护与检修 .....	41
第四节 锅炉补给水的膜分离技术 .....	47
一、反渗透系统 .....	47
二、纳滤及其工艺系统 .....	58
三、微滤、超滤及其工艺系统 .....	60
四、电除盐及其工艺系统 .....	64
五、膜分离设备的运行、维护与检修 .....	65
第五节 凝结水精处理技术 .....	69
一、凝结水精处理原理与系统 .....	70
二、凝结水前置过滤处理 .....	71
三、凝结水粉末树脂处理工艺 .....	73
四、凝结水高速混床及其系统 .....	74
五、凝结水铵化混床工艺 .....	79
六、精处理设备的运行、维护与检修 .....	81
<b>第三章 锅炉水化学工况及调节优化</b> .....	<b>86</b>
第一节 锅炉水化学概述 .....	86
一、水化学调节的目的 .....	86
二、常用水化学工况比较 .....	87
第二节 锅炉炉水的固态碱处理技术 .....	89
一、磷酸盐处理 .....	90
二、磷酸盐隐藏现象 .....	93
三、平衡磷酸盐处理 .....	98
四、苛性处理 .....	103
第三节 锅炉炉水的挥发碱处理技术 .....	105
一、还原性全挥发性处理 .....	105

二、弱氧化性挥发性处理 .....	110	二、氧化性处理控制指标及意义 .....	115
第四节 氧化性处理 .....	111	三、氧化性处理实施方法 .....	116
一、锅炉给水氧化性处理 .....	111	四、汽包锅炉炉水的氧化性处理 .....	119
<b>第四章 热力系统的结垢与积盐特性 .....</b>	<b>122</b>		
第一节 热力系统结垢特性 .....	122	一、蒸汽的机械携带 .....	127
一、钙镁水垢 .....	122	二、蒸汽的溶解携带 .....	128
二、硅酸盐水垢 .....	124	三、过热器内盐类的溶解与沉积过程 .....	134
三、氧化铁垢 .....	124	四、杂质在汽轮机的沉积、腐蚀和控制方法 .....	136
四、铜垢 .....	126		
第二节 蒸汽的溶解与携带特性 .....	127		
<b>第五章 热力设备的腐蚀与防护 .....</b>	<b>147</b>		
第一节 腐蚀的基本概念 .....	147	二、(FGD) 的腐蚀机理 .....	176
一、腐蚀的定义和分类 .....	147	三、湿法脱硫系统中的主要腐蚀因素和介质 .....	177
二、影响金属腐蚀的因素 .....	147	四、FGD 装置的腐蚀部位 .....	178
三、金属腐蚀的防护措施 .....	149	五、防腐蚀措施 .....	179
第二节 热力设备的腐蚀特征 .....	150	第六节 脱硝系统的腐蚀与防护 .....	180
一、炉前系统的腐蚀 .....	150	一、选择性催化还原烟气脱硝技术 .....	181
二、水汽系统的腐蚀 .....	155	二、选择性非催化还原技术(SNCR) .....	186
第三节 汽轮机系统的腐蚀与防护 .....	166	第七节 内冷水系统的腐蚀与防护 .....	188
一、汽轮机的积盐 .....	167	一、内冷水系统铜导线腐蚀 .....	189
二、汽轮机的应力腐蚀 .....	167	二、内冷水中 Cu 的容许浓度与起始 pH 值关系 .....	191
三、汽轮机的腐蚀疲劳 .....	167	三、内冷水中 Cu 稳定和钝化的条件 .....	192
四、汽轮机的冲蚀 .....	168	四、铜腐蚀的影响因素 .....	193
五、汽轮机的酸腐蚀 .....	168	第八节 凝汽器系统的腐蚀与防护 .....	196
六、汽轮机固体颗粒的磨蚀 .....	169	一、氨腐蚀 .....	196
七、汽轮机的点蚀 .....	169	二、应力腐蚀破裂 .....	197
第四节 锅炉的停(备)用保护技术 .....	169	三、腐蚀疲劳 .....	198
一、停炉腐蚀机理 .....	169	四、电偶腐蚀 .....	198
二、锅炉停炉保护的基本原则 .....	170	五、氧腐蚀 .....	200
三、锅炉停炉保护控制方法 .....	170		
四、锅炉停炉保护方法的选择 .....	174		
第五节 脱硫系统的腐蚀与防护 .....	174		
一、脱硫系统 .....	175		
二、石灰石-石膏法烟气脱硫装置 .....			
<b>第六章 机组水汽系统化学监督技术 .....</b>	<b>202</b>		
第一节 化学监督概述 .....	202	二、水汽系统的核心仪表 .....	203
一、化学监督的类型与准则 .....	202	三、化学仪表的常见故障与处理 .....	205



第二节 机组各阶段的化学监督 .....	207	三、停(备)用及启动阶段化学 监督 .....	211
一、基建阶段的化学监督 .....	207	四、检修阶段的化学监督 .....	213
二、正常运行阶段的化学监督 .....	210		
<b>第七章 电力用油(气) .....</b>	<b>218</b>		
第一节 电力用油的类型与性质 .....	218	一、汽轮机油的技术规范 .....	238
一、变压器油的理化性能 .....	218	二、汽轮机油的监督维护 .....	240
二、汽轮机油的理化性能 .....	225	三、抗燃油的运行与维护 .....	244
三、抗燃油的理化性能 .....	226	第四节 六氟化硫 .....	245
第二节 变压器油 .....	227	一、SF <sub>6</sub> 气体的理化性质 .....	246
一、变压器油的技术规范 .....	227	二、SF <sub>6</sub> 的质量与检测标准 .....	249
二、变压器油的监督维护 .....	230	三、SF <sub>6</sub> 中的杂质与净化 .....	254
三、变压器油的处理与再生技术 .....	234	四、SF <sub>6</sub> 气体绝缘电气设备 .....	258
第三节 汽轮机油 .....	238	五、SF <sub>6</sub> 的分解 .....	261
<b>第八章 电力用煤 .....</b>	<b>273</b>		
第一节 煤炭的分类与基本特性 .....	273	第二节 电力用煤样品的采取、制备 与分析 .....	279
一、煤炭的形成与分类 .....	273	一、煤样的采取 .....	279
二、煤的组成与基本特性 .....	276	二、电力用煤样品的制备 .....	291
三、电力用煤分析项目和符号 .....	276	三、电力用煤的工业分析 .....	296
四、煤分析基准及其换算 .....	278	四、煤中硫元素的测定 .....	305
五、试验结果计算中的数据修约 原则 .....	279	五、电力用煤的发热量测定 .....	309
六、重复性及再现性试验 .....	279		
<b>第九章 火电厂节水技术 .....</b>	<b>314</b>		
第一节 火电厂的主要用水系统 .....	314	二、高浓缩倍率运行方案的确定 .....	320
一、火电厂的用水系统 .....	314	三、循环水系统补充水的处理 .....	321
二、节水的关键环节 .....	316	四、循环水处理 .....	323
第二节 水平衡试验及优化 .....	317	五、下游用水对浓缩倍率的影响 .....	323
一、水平衡试验 .....	317	第四节 废水综合利用 .....	323
二、水平衡优化 .....	318	一、废水综合利用的顺序 .....	323
第三节 提高浓缩倍率 .....	319	二、废水的分类收集 .....	324
一、浓缩倍率与补水量的关系 .....	319	三、废水综合利用方式 .....	324
<b>参考文献 .....</b>	<b>326</b>		



为提高火力发电机组的经济性和热能利用率,需要增大机组容量,并提高机组的参数。增大单机容量,不但可以降低机组每千瓦的投资,还可提高机组热效率,降低发电煤耗,同时排放亦相对减少,而且还可以提高火力发电机组的效率。我国自20世纪80年代后期开始从国外引进300MW、600MW亚临界机组,目前,国产1000MW超超临界机组已投入运行,300MW以上的机组已成为电力行业的主力机型。

所谓的超临界机组是指主蒸汽压力高于临界压力(22.12MPa)的锅炉和汽轮发电机组。由于在临界参数下汽、水密度相等,因此,在超临界压力下无法维持自然循环,即超临界机组不能采用汽包锅炉,只能采用直流炉。它的工作过程是依靠给水泵的压力将给水通过预热、蒸发、过热而变成过热蒸汽。在超临界机组中,给水、汽温、燃烧系统是密切相关的,不能独立控制,而应该对其进行整体控制,控制系统也就相对更加复杂。

## 二、电厂金属材料

对火力发电机组水汽系统热力设备金属材料的选择取决于金属材料的工作条件和工作介质,主要是工作温度、压力、应力及介质的腐蚀性。机组参数越高,热力设备的工作温度越高、工作压力越大,介质的腐蚀性也越强,对热力设备材料性能的要求也越高。在超临界机组中,金属材料长期工作在高温、高压和腐蚀介质的条件下,这就要求金属部件采用大量新型耐热钢。耐热钢的化学成分以及热处理方式不同,其金相组织结构也就不同,火电机组用金属材料主要分为两大类:铁素体钢(包括珠光体、贝氏体和马氏体及其双相钢)和奥氏体钢。

近几十年,超临界机组发展迅速,然而发达国家的运行经验证明,传统的低合金铁素体类耐热钢用于亚临界机组,几乎已经达到了它的使用极限。为适应火力发电机组向超临界、超超临界的发展,发达国家研究开发了一批性能优异的新型钢种:提高铁素体钢的高温蠕变断裂强度的新型铁素体锅炉用耐热钢(主要分为2%Cr、9%Cr、12%Cr三大系列);提高奥氏体钢的高温强度、抗氧化和抗腐蚀性的新型奥氏体锅炉用不锈钢(主要分为18%Cr、20%~25%Cr两大系列)。其中铁素体耐热钢中2%Cr系列主要包括T/P22、T/P23等;9%Cr系列主要包括T9、HCM9M、T/P91、T/P92、EM12等;12%Cr系列主要包括HT91、HT9、HCM12、T122、NF12、SAVE12等。奥氏体耐热钢中18%Cr系列主要包括TP347H、TP347HFG、Super304H、TempaloyA-1等;20%~25%Cr系列主要包括HR3C、NF709、TempaloyA-3、SAVE25等。

下面概要介绍机组关键部件的金属材料的选材,以利于化学监督的进行。

(1) 水冷壁 水冷壁用钢一般应具有一定的室温和高温强度,良好的抗疲劳、抗烟气腐蚀、耐磨损性能,并要有好的工艺性能,尤其是焊接性能。采用焊后不需热处理的材料,可简化制造、安装和检修工艺。对于常规超临界锅炉和主蒸汽温度为600℃的超超临界锅炉,水冷壁出口温度在450℃以下,其管材基本上仍可采用1.25Cr-0.5Mo等级的低合金钢,如T12。若将水冷壁管的出口温度提高到470℃,水冷壁管材可以采用2.25Cr-1Mo等级的合金钢T22,在水冷壁高热负荷区(燃烧器区)可采用部分的T23。总之,水冷壁在设计中通常选用低合金耐热钢材料,主要为T2、T12、T22、T23、欧洲研制的15Mo3以及我国常用的15CrMo、12Cr1MoV等材料。其中T2、T12多用于温度较低的管排上,例如位于炉膛下部的螺旋管圈水冷壁;在温度较高的部位常用15CrMo、T22和T23。这些低合金铁素体材料具有良好的力学性能和加工性能,能够适合水冷壁管排的布置。

(2) 汽水分离器 汽水分离器的工作温度随负荷变化而变化,一般为350~430℃,虽然工作温度不高,但需要承受机组频繁启停和快速负荷变化,因此对汽水分离器材料的要求

主要是应具有较高的蠕变性能,以适应在启停过程中汽水分离器从湿态到干态运行转换过程中所承受的严重的热疲劳应力。材料主要为 P12、P22、P23、X20CrMoV121 以及 P91 等。

(3) 联箱与管道 由于联箱(末级过热器、再热器出口联箱)和管道(主蒸汽、导汽再热蒸汽管道)布置在炉外,不属于锅炉受热面,没有烟气加热以及腐蚀问题,因此可以认为管壁温度与蒸汽温度相近,联箱和管道对材料的要求基本一致,主要应具有足够高的持久强度、高温蠕变强度、抗疲劳和抗蒸汽氧化性能。不同之处在于对联箱材料的选择应该考虑其与过热器、再热器和出口连接管之间的焊接问题,因此还要有良好的加工工艺和焊接性能。铁素体耐热钢的热膨胀系数小、热导率高,在较高的启停速率下,不会造成联箱、管道厚壁部件严重的热疲劳损坏,所以联箱与管道的首选材料是铁素体耐热钢。目前联箱和管道用钢主要有 P91、P92、P122 和 E911。

(4) 过热器/再热器 过热器/再热器管在锅炉中是服役条件最为复杂、恶劣的部件,它们在锅炉中承受的温度和压力最高,管内壁和高温、高压蒸汽接触,管外壁和高温烟气接触,因此所用钢材在满足持久强度、蠕变强度要求的同时还要满足烟气侧抗腐蚀和飞灰冲刷性能、蒸汽侧抗氧化性能等,同时还需具有较好的冷热加工工艺性能、焊接性能和经济性。

对于低温段过热器和再热器,一般使用的是 T22、12Cr1MoV、T23 等材料。在过热器和再热器的高温段,当使用温度在 620℃ 左右时,则使用的是 T91 或 T92 钢,而不必使用奥氏体钢。基于上述情况,过热器和再热器选用的耐热管材主要有 T22、T23、T91、T92、T122、TP347H、TP347HFG 等。

### 三、超临界机组发展概况

超临界机组和超超临界机组作为当前燃煤电厂先进可靠的发电设备,是火电厂热力系统从低压→中压→高压→超高压-亚临界的发展升级。经济性上超临界机组和超超临界机组发电效率可以大幅度提高,降低发电煤耗;环保上减少了 CO<sub>2</sub> 和污染物的排放量,并采用了先进的污染物排放控制技术,有效地降低了氮氧化物和硫氧化物的排放。因此工业发达国家非常重视发展超临界机组及超超临界机组,超临界和超超临界机组已是这些国家的主力机组。

超临界机组是指其主蒸汽压力和温度超过了水的临界参数(水的临界点:临界压力 22.12MPa、临界温度 374.15℃)的发电机组。常规超临界机组蒸汽参数一般为 24.2MPa/538/566℃ 或 24.2MPa/566/566℃,超超临界机组是指其主蒸汽压力超过了 25MPa、温度超过了 566℃ 的发电机组。超临界和超超临界发电技术的发展历程可以分成三个阶段。

第一个阶段从 20 世纪 50 年代开始,以美国、德国为代表。当时起步的参数就是超超临界,但由于超过了当时的材料技术发展水平,致使超临界机组的可用率和可靠性都较低,迫使机组降低参数运行。60 年代后期,超超临界机组的参数均降低到常规超临界参数。直至 80 年代,美国超临界机组参数基本稳定在这个水平。

第二阶段从 20 世纪 80 年代初开始,由于材料性能的改进和对电厂水化学方面认识的深入,美国对已投运的机组进行了优化及改造,大大提高了机组的经济性、可靠性、运行灵活性,其可靠性和可用率指标已经达到甚至超过了相同容量的亚临界机组。随即美国又将超临界技术转让给日本。这样,超临界机组市场逐步转移到日本及欧洲,涌现出一批新超临界机组。

第三阶段从 20 世纪 90 年代开始,由于环保和节约能源的需要,机械和材料等问题的逐步解决,结构设计的创新、工艺技术的进步和常规超临界技术的日趋成熟,为超超临界机组的应用提供了必要条件。高参数的超超临界机组进入了一个新的发展时期。

经过四十多年的不断完善和发展,超临界参数机组已进入了成熟和实用阶段,具有更高参数的超超临界机组也已经成功地投产、运行。目前发展超超临界发电技术领先的国家主要是日本、德国和丹麦等。

我国超临界、超超临界机组发展较晚,发展超临界和超超临界机组的策略是通过引进国外技术或合作制造,逐步实现主设备国产化和批量化。20世纪80年代后期开始从国外引进30万千瓦、60万千瓦亚临界机组。目前,在国家引进技术的支持下,我国三大发电设备制造厂和国外制造商开展合作,通过联合设计、制造,已经掌握了超临界机组的设计制造技术,国产百万千瓦超超临界机组已于2006年投运。

## 第二节 电厂化学工作内容与任务

### 一、电厂水汽系统及其杂质来源

在火力发电厂中,水既是热力系统的工作介质,也是某些热力设备的冷却介质。火电厂中超临界及其以上参数机组的水汽系统的工作流程为:补给水处理设备→凝汽器水箱→凝汽器(热井)→凝结水泵→凝结水精处理装置→轴封加热器→低压加热器→除氧器→给水泵→高压加热器→省煤器→低温过热器→一级减温器→高温过热器→二级减温器→集汽母管→汽轮机高压缸→再热器→汽轮机中压缸→汽轮机低压缸→凝汽器。与水汽系统工作流程相对应的是水在热力设备系统中的相变过程,给水进入锅炉被加热后变成蒸汽,流经过热器进一步被加热后变成过热蒸汽,再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,经过凝结水泵、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。在此循环中,水的质量决定着与之密切接触的锅炉炉管工作状态(如结垢、积盐、腐蚀等)及服役寿命,因此,水汽品质的好坏关系到热力设备能否安全、经济地运行。

机组的参数越高,要求的水汽品质也越高。中压以上机组要求对凝结水进行部分或全部精处理,这样可以进一步降低给水中杂质含量,提高水汽品质。然而,长期的运行实践证明,仍有微量杂质进入水汽系统中,这对于高参数机组是极其危险的。

水汽系统中微量杂质的来源,主要有以下几方面。

(1) 凝结水中的杂质 凝结水中的杂质主要来自于凝汽器的泄漏。尽管凝汽器在制造、运输、安装、调试等各环节都很严格,但是长期运行过程中水汽的连续冲刷、负荷与工况变化所引起的交变振动作用以及凝汽器管材的腐蚀,仍会使凝汽器产生泄漏。为了防止凝汽器管因腐蚀引起冷却水泄漏,目前超临界机组的凝汽器常采用不锈钢管和钛管。

不锈钢管与铜合金管相比,不仅具有较高的机械强度和弹性模量以及更佳的抗污染水体和抗冲刷的能力,而且不锈钢管价格合理。但是材质存在缺陷、交变应力幅度较大、冷却水水质较差等因素很可能引起不锈钢管发生晶间腐蚀、应力腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀以及微生物腐蚀等,从而导致凝汽器泄漏。而钛金属在海水等自然水中几乎不会发生任何形式的腐蚀,在我国,全钛凝汽器的应用也相当广泛,已经从沿海和海水倒灌水域发展到了部分内陆水域,特别是高含盐量或高含沙量的水域。但是由于钛管的壁厚较薄,且钛管的弹性模量约为铜管的一半,因此钛管的振动问题直接关系到凝汽器的可靠性。补给水、疏水和辅助蒸汽等介质对钛管的直接冲击以及防冲击挡板不牢固也可能引起钛管损伤,导致凝汽器泄漏。另外,由于凝汽器管与管板连接处不严密而发生的较轻微渗漏也会将杂质带入凝结水。

因凝汽器泄漏而进入凝结水中的冷却水,大多是未经任何处理的天然水或未经深度处理

的中水。由此而进入凝结水中的杂质不仅含量高，而且种类复杂，所以一旦凝汽器发生较严重的泄漏或延时较长，即使再生频繁，也难以避免凝结水中杂质含量超标。

(2) 补给水中的杂质 补给水中的杂质来源有三个：其一，虽然天然水经多级处理，符合一定的质量标准，可作为火力发电厂的补给水，但在国家规定的标准中，是允许其中残留微量杂质的，并非其中没有杂质；其二，目前采用的常规微量分析手段来检测水中相关杂质的含量是有一定局限性的，特别是对于某些金属离子，如  $Zn^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Ni^{2+}$  等，根本就检测不出来，而在相关的垢样成分分析中则都能发现此类杂质；其三，原水水质突变致使水处理能力下降或水处理运行出现异常等，导致补给水出现异常，并将其中的杂质带入给水中。

(3) 水处理运行过程中的杂质 如细小的离子交换树脂粉末因未能被树脂捕捉器有效截留而漏入给水中，或者是树脂的基团降解脱落而被处理水带走；前置过滤器的滤料（纸粉或粉末树脂等）带入的水溶性杂质（ $Na^+$ 、有机物等），也可能被带入给水中；因锅炉补给水处理系统运行不当，带入再生剂及有机物等；在水处理设备投运初期、水箱密封不严、水泵轴封不严等所带入的  $O_2$ 、 $CO_2$  等气体杂质。这些都可能增加给水中杂质。

(4) 给水处理过程中的杂质 杂质来源主要是给水处理过程中加入的化学药品。给水处理的主要目的，是为了防止给水中的溶氧和酸性杂质对热力设备金属的腐蚀而进行的化学除氧处理和 pH 值调节处理（加入碱化剂）。如果碱化剂的纯度不够会带入杂质；碱化剂本身也会充当杂质对设备造成腐蚀。在超（超）临界机组中，给水处理过程中所加的碱化剂为  $NH_3$ ，pH 值调节处理的结果是使给水中维持一定的  $NH_3$  余量。 $NH_3$  进入水汽系统后，随高温蒸汽带入凝汽器的空抽区部位， $NH_3$  量在该处发生急剧浓缩，高浓度的氨对凝汽器、轴封加热器、低温加热器等铜部件将造成严重侵蚀。

(5) 水汽系统的金属腐蚀产物 机组停用期间产生停用腐蚀，其腐蚀产物在机组启动后带入水汽系统；炉前热力系统包括加热器汽侧在运行中产生腐蚀，腐蚀产物随给水带入水汽系统；运行中易产生沉积物下的腐蚀，其腐蚀产物也会进入水汽中；高参数机组运行时，金属在水汽中氧化速度增快，生成的氧化皮剥落，除了引起蒸汽通流部件的冲蚀和磨蚀外，氧化皮变成细小的氧化铁颗粒，穿过凝结水精处理系统进入水汽系统。

(6) 其他因素 系统设备的局部检修带入的杂质、疏水回收带入的杂质、化学清洗时未冲洗干净等都会对水汽系统带来影响，增加其杂质的含量。

## 二、电厂化学工作内容

在长期的实践中人们认识到，热力系统中水汽品质的优劣，是影响电厂热力设备（锅炉、汽轮机）安全和经济运行的重要因素之一。为了保证热力系统中水汽品质良好，必须对水进行适当的净化处理，并严格地监督水汽质量。如果水汽品质不良将引起如下危害。

(1) 热力设备结垢 如果进入锅炉的水质不良，则经过一段时间的运行后，在与水接触的受热面上，就会结垢。垢的危害性有以下几点。其一，因水垢的导热性很小，仅为金属的  $1/10 \sim 1/100$ ，使锅炉热效率降低，浪费大量燃料。其二，水垢极易在热负荷很高的炉管中生成，使结垢部位的金属管壁温度过高，引起金属强度下降，这样在管内压力的作用下，就会发生管道局部变形、产生鼓包，甚至爆管等严重事故。其三，炉管结垢后会使得管内流通截面积减少，流动阻力增大，破坏正常水循环，降低锅炉出力。其四，结垢后，需要停运检修或化学清洗，减少了设备的年利用率和使用寿命，并且耗费大量的人力、物力。另外，在汽轮机凝汽器内结垢会导致凝汽器真空度降低，从而使汽轮机的热效率和出力下降。

(2) 热力设备腐蚀 水汽的品质不良会不同程度地引起火力发电厂热力设备（给水管

道、各种加热器、锅炉的省煤器、水冷壁、过热器和汽轮机凝汽器等)的腐蚀。腐蚀会缩短设备本身的使用寿命,造成经济损失,同时腐蚀产物还会转入水中,使给水中杂质增多,从而加剧了受热面上的结垢过程,而结成的垢转而又会促进锅炉炉管的腐蚀。如此恶性循环,降低了机组运行的安全性。此外,如金属的腐蚀产物被蒸汽带到汽轮机中沉积下来后,也会严重地影响汽轮机的安全、经济运行。

(3) 过热器和汽轮机积盐 水质不良使锅炉产生蒸汽的纯度下降,随蒸汽带出的杂质就会沉积在蒸汽流通的部位(过热器和汽轮机),即产生积盐现象。过热器管内积盐同样会引起金属管壁过热、金属强度下降、变形、鼓包,甚至爆管。汽轮机内积盐使得蒸汽流通的截面积减小,增大蒸汽流通的阻力和轴向推力,使汽轮机的出力下降。当汽轮机的积盐严重时,还会使推力轴承负荷增大,隔板弯曲,造成事故停机。

锅炉水化学工作的总体方针就是尽可能减少机组的结垢、腐蚀,保持高水平的蒸汽纯度,确保机组安全经济运行,达到或超过预期的服役年限。随着机组参数的提高,电厂化学工作的作用越发显得重要了。火力发电厂中,电厂化学的主要工作内容如下。

(1) 水净化工作 通常,火力发电厂中水净化工作有补给水净化、凝结水净化和内冷水净化等。

补给水净化: 补给水的来源是没有经过净化处理的天然水。天然水中含有很多杂质,有的呈固态,有的呈气态或液态。杂质大多以分子态、离子态或胶体颗粒存在于水中,如果天然水直接进入水汽循环系统,将会造成各种危害。因此,水净化工作的目的之一就是为热力系统制备所需高品质的化学补给水。它包括除去天然水中的悬浮物和胶体状态杂质的混凝、澄清、过滤等预处理,及除去水中全部溶解盐类的除盐处理。

凝结水净化: 火力发电厂锅炉给水由凝结水和锅炉补给水组成,凝结水是锅炉给水的主要组成部分,通常凝结水量占锅炉给水总量的90%以上。因此,给水质量很大程度上取决于凝结水的水质。凝结水是由蒸汽冷凝形成的,理论上凝结水应该很纯净。但实际上,凝结水由于凝汽器泄漏、金属腐蚀产物的带入、空气漏入以及补给水带入等都会使得凝结水受到污染。所以需要凝结水进行精处理,以除去凝结水中的微量盐类、悬浮物及金属腐蚀产物。

内冷水净化: 发电机是火力发电厂的三大主机(锅炉、汽轮机和发电机)之一,它在运转过程中有部分动能转换成热能,这部分热量要及时导出,否则会使发电机定子、转子绕组过热甚至烧毁。因此,需要使用冷却介质冷却发电机定子、转子和铁芯,现在普遍使用的发电机冷却介质为氢气和水。虽然水冷发电机有众多优点,也得到了广泛应用,但是大型发电机内冷水水质及运行方面仍存在很多问题。空芯铜导线腐蚀速率高,水质指标难以合格(包括内冷水pH值控制不稳,电导率、铜离子含量超标严重),从而使泄漏电流增大,电气绝缘性能降低,沉积物阻塞水回路造成线圈温升增加;系统密闭性较差,造成补水频繁、操作运行操作量大、水量损失较大等。水质不良可能引起频繁跳机、降负荷运行等事故,对发电机的安全运行构成严重威胁。因此,净化发电机内冷水,对防止内冷水系统腐蚀十分重要。目前内冷水净化的方法有单纯补充除盐水或凝结水运行方式、加药(缓蚀剂等)处理法、(双)小混床处理法和新型发电机内冷水超净化装置处理法等。

(2) 水处理工作

① 给水处理: 火力发电厂锅炉给水处理的主要目的是抑制给水系统的全面腐蚀和流动加速腐蚀(FAC),以保证给水中铁、铜含量合格。这不仅能够减少给水带入锅炉的腐蚀产物和其他杂质,而且可以防止采用给水作为减温水时引起过热器、再热器和汽轮机的积盐问题。目前超临界、超超临界给水处理主要有全挥发处理(AVT)和加氧处理(OT)两种方

式。全挥发处理是指在对给水进行热力除氧的同时，向给水中加入氨和除氧剂（如联氨），或只向给水中加氨而不再添加任何其他药品的给水处理方式。因其所用药品（氨和联氨）都是挥发性的，所以这类给水处理方式成为全挥发处理（all volatile treatment, AVT）。而加氧处理（oxygenated treatment, OT）是指向给水中加微量的氧（不对给水进行热力除氧）的给水处理方式。

② 冷却水处理：在火力发电厂中，冷却水主要用于冷却凝汽器中汽轮机做功后的乏汽。冷却水中含有很多杂质，这些杂质可能附着在凝汽器管内和冷却水的流通部位，造成凝汽器管内生成附着物和腐蚀。产生的附着物会引起凝汽器端差升高、真空度下降，影响汽轮机的出力和运行的经济性；凝汽器管的腐蚀会使金属的机械强度减弱甚至穿孔，从而导致冷却水漏入凝结水中造成给水污染，影响机组经济安全运行。冷却水处理方法有排污法、外部处理法（石灰处理和离子交换）和内部处理法（酸化法、加药法和炉烟法）等。

③ 废水处理：根据工业废水的排放周期，可以将工业废水分为经常性排水和非经常性排水。经常性排水主要包括锅炉补给水处理系统排水、凝结水精处理系统排水、实验室及取样系统排水、输煤系统冲洗排水、烟囱返回水等。非经常性排水主要包括锅炉化学清洗排水、空气预热器冲洗排水、除尘器冲洗排水、锅炉烟气侧冲洗水、停炉保护排水、运行前冲洗水，煤场雨水等。由于工业废水的种类多，各类废水的污染物种类、含量和排量都不固定，致使工业废水的成分相当复杂，其主要污染物有悬浮物、油、有机物和硫化物等，这类废水若不经处理就排放会引起不同程度的环境污染，造成生态破坏，因此必须进行废水处理。废水处理即对电厂生产过程中产生的各种废水进行分类或集中处理，其目的是处理电厂生活用水、含油废水、各生产工艺排放的工业废水，使之达到工业废水排放标准后回收利用。通常废水集中处理系统主要包括生活污水处理系统、含油废水处理系统和工业废水处理系统。

(3) 化学监督工作 化学监督工作直接关系到电厂主要生产设备的经济安全运行，在电厂生产中占重要地位。化学监督主要是对电厂的水、汽、气、煤、油和灰进行监督，为电厂各种设备的正常运行提供保障。工作任务是：供水、供氢；及时反映和监督汽品质，对水汽质量进行监控和必要的处理；监督凝汽器泄漏、除氧器运行，以防止热力系统腐蚀、结垢、积盐，避免因水汽质量故障引起检修；及时提供燃煤、飞灰分析数据，为锅炉及时调整燃烧工况提供依据，以降低煤耗，提高热效率；做好油质监督及防劣化措施；监督废液、废水、废气的达标排放等。

(4) 其他工作 包括对新建或运行锅炉进行定期或不定期的化学清洗，机组停运期间的保养工作，热化学实验，等等。

### 三、超临界机组典型的化学监督与控制指标

因超临界参数机组采用直流锅炉，没有进行水汽分离的汽包，给水一次性地变成过热蒸汽。直流锅炉没有水的循环，故不能进行锅内加药处理，也不能通过排污方式将杂质排出。在直流锅炉中，随给水带入锅炉内的各种杂质一部分被蒸汽溶解携带进入汽轮机，余下的则沉积在锅炉的受热面上，导致热力设备的腐蚀、结垢和积盐；杂质在锅炉炉管内沉积，还会引起水汽系统流动总阻力的增加，增大给水泵的能耗量，甚至迫使机组降负荷运行。因此，为了确保机组的安全、经济运行，给水质量必须满足超临界直流锅炉的水质要求。

由直流锅炉的工作原理可知，超临界机组对给水、凝结水和主蒸汽等控制要求很高。为了使水、汽质量达到超临界机组安全运行的标准，水、汽质量监督十分重要。通过即时或定



期监督水、汽品质的状况，看其是否符合水、汽质量标准，以便当水质出现劣化时及时采取处理措施。

超临界机组典型的化学监督内容与控制指标如下。

(1) 给水的监督

① 氢电导率：污染水汽介质的主要物质是电解质，当较纯净的给水、蒸汽凝结水被电解质污染时，电导率会有明显升高。因此，电导率是监督水、汽循环系统中水、汽纯度的最重要的参数，它能够表征含盐量的多少。但是由于锅炉给水采用加氨处理调节水质 pH，氨溶于水形成弱碱性溶液，使电导率明显升高，影响水中含盐量的检测。因此采用阳离子交换除去氨，然后测定电导率便消除了氨的干扰。氢电导率测试是先将水样经阳离子交换，使水中的阳离子转换为氢离子，这样可使电导率测试值的灵敏度提高 3~4 倍。因为在水中电极有很高的灵敏度，能有效地反映水质的变化趋势，故氢电导率测定是最简单的测定方法。

② pH 值：pH 值是给水处理工况的重要控制指标。无论是采用 OT 或 AVT 工况，都以热力系统腐蚀产物最少为原则。给水的 pH 值调节就是向给水中加入一定量的碱性物质，使给水的 pH 保持在适当的碱性范围内，从而将凝结水-给水系统中钢和铜合金材料的腐蚀速度控制在较低范围，以保证给水中铜和铁的含量符合规定的标准。目前一般采用氨作为火电厂中调节给水 pH 值的碱化剂，所以 pH 值还作为加氨的控制指标来控制氨的加入量。

③ 溶解氧：给水处理方式的不同，对给水中溶解氧的控制指标也不同。还原性全挥发处理 [all-volatile treatment (reduction), AVT (R)] 通常采用热力除氧和化学除氧相结合的方法除去给水中的氧；弱氧化性全挥发处理 [all-volatile treatment (oxidation), AVT (O)] 只通过热力除氧，而不再添加其他任何除氧剂对给水进行辅助除氧；加氧处理 (OT) 是对给水采用加氧处理，监督溶解氧的含量，以控制腐蚀电位使给水中的全铁值保持在尽可能低的水平。无论采用何种水处理方式，其目的都是在金属表面形成并保持完整的具有保护性的氧化膜，以尽量减少机组的结垢、腐蚀速率，确保机组安全经济运行。

④ 硅含量、钠离子量：直流锅炉给水中的绝大部分钠盐和全部硅酸化合物能被蒸汽携带到汽轮机中引起汽轮机积盐，因此，对给水中硅含量、钠离子量的监督十分重要。虽然，电导率能表示水中含盐量的多少，却不能表示出具体某种物质的量，尤其不能反映钠离子的变化，根据超临界机组蒸汽携带杂质的特点，也必须控制给水中钠、硅的含量满足蒸汽质量的要求。

⑤ 铁、铜的含量：给水中铁和铜的含量说明系统中金属的溶解过程，它可以反映锅炉及汽机中可能存在的沉积物的量，还可以作为评价热力系统金属腐蚀情况的依据之一。

表 1-1、表 1-2 分别为给水溶解氧含量、联氨浓度和 pH 值标准和给水质量标准。

表 1-1 给水溶解氧含量、联氨浓度和 pH 值标准

处理方式	pH 值(25℃)		溶解氧/(μg/L)	联氨/(μg/L)
	有铜系统	无铜系统		
挥发处理	8.8~9.3	9.0~9.6	≤7	10~50
加氧处理 <sup>①</sup>	8.5~9.0	8.0~9.0	30~150	

① 低压给水系统（除凝汽器外）有铜合金材料的应通过专门试验，确定在加氧后不会增加水汽系统的铜含量，才能采用加氧处理。

注：标准摘自 DL/T 912—2005 超临界火力发电机组水汽质量标准。