



超超临界火电机组培训系列教材

# 锅炉分册

主 编 章德龙

副主编 王云刚 缪加庆



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超超临界火电机组培训系列教材

# 锅炉分册

主 编 章德龙

副主编 王云刚 缪加庆



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内容提要

本书是《超超临界火电机组培训系列教材》的《锅炉分册》。全书共十五章，详细介绍了超超临界直流锅炉的总体，水冷壁，启动旁路系统，过热器与再热器，制粉系统，燃烧设备，结渣、腐蚀及低 $\text{NO}_x$ 技术，空气预热器，送、引风机及一次风机，锅炉阀门，吹灰装置，除渣、除尘及除灰系统，启动与停运，运行调整，常见故障及处理等。

本书适合从事1000MW超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及其管理工作的工程技术人员阅读，可作为电厂生产人员的培训教材，亦可供有关专业人员和高等学校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

超超临界火电机组培训系列教材. 锅炉分册/章德龙主编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5123-4390-0

I. ①超… II. ①章… III. ①火力发电-发电机组-技术培训-教材②火力发电-锅炉-技术培训-教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 089915 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013年10月第一版 2013年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 41.25印张 990千字 1插页

印数 0001—3000册 定价 106.00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

# 《超超临界火电机组培训系列教材》

## 编 委 会

主 任 姚秀平  
副主任 倪 鹏 刘长生  
委 员 杨俊保 任建兴 符 杨 郑蒲燕 高 亮 肖 勇 章德龙  
丁家峰 钱 虹 吴春华 徐宏建 张友斌 李建河 潘先伟  
张为义 符义卫 黄 华 陈忠明 洪 军 孙志林

### 《锅炉分册》编写人员

主 编 章德龙  
副主编 王云刚 缪加庆

### 《汽轮机分册》编写人员

主 编 丁家峰  
副主编 陆建峰 王亚军 戴 欣

### 《电气分册》编写人员

高 亮 江玉蓉 陈季权 胡 荣 杨军保 洪建华 编 著

### 《热控分册》编写人员

主 编 钱 虹  
副主编 黄 伟 刘训策 汪 容

### 《电厂化学分册》编写人员

主 编 吴春华  
副主编 龚云峰 赵晓丹 王 啸 诸红玉 徐刚华

### 《燃料与环保分册》编写人员

主 编 徐宏建  
副主编 辛志玲 谈 仪 李中存 许 斌

# 前言

进入 21 世纪,我国经济飞速发展,电力需求急速增长,电力工业进入了快速发展的新时期。截至 2011 年底,全国发电装机容量达 10.56 亿 kW,首次超过美国(10.3 亿 kW),成为世界电力装机第一大国。其中,火电 7.65 亿 kW。目前,全国范围内已投产的单机容量 1000MW 超超临界火电机组共有 47 台,投运、在建、拟建的百万千瓦超超临界机组数量居全球之首。华能玉环电厂、华电邹县电厂、外高桥第三发电厂、国电泰州电厂等一大批百万千瓦级超超临界机组的相继投产,标志着我国已经成功掌握世界先进的火力发电技术,电力工业已经开始进入“超超临界”时代。根据电力需求和发展的需要,未来几年,我国还将有大量大容量、高参数的超超临界机组相继投入生产运行。因此,编写一套专门用于 1000MW 超超临界机组的培训教材有着现实需求的积极意义。

上海电力学院作为一所建校六十余年的电力院校,一直以来依托自身电力特色,利用学校的行业优势,发挥高校服务社会的功能,依托丰富的电力专业师资资源,大力开展针对发电企业生产人员的各类型、各层次、各工种的技术培训。从 20 世纪 70 年代至今,学校已先后为全国近上百家电厂,从 125~600MW 的超临界机组,以及我国第一台 1000MW 超超临界火力发电机组——华能玉环电厂等培养了大批技术人才,成为最早开始培训同时接受培训厂家最多、机组类型最丰富的院校之一。2012 年 11 月,学校以 1000MW 火电机组培训代表的面向发电企业技术项目正式被上海市评为 2006~2012 年市级培训品牌项目。

本套丛书包括《锅炉分册》、《汽轮机分册》、《电气分册》、《热控分册》、《电厂化学分册》与《燃料与环保分册》6 个分册,是学校基于多年以来的培训经历累积而成,并融合多家在学校培训的厂家资料,由上海电力学院和皖能铜陵发电有限公司合作完成的。

丛书在编写过程中,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、设备系统、运行特点和事故分析,包含国内主要四大发电设备制造企业——上

海电气、哈尔滨电气、东方电气、北京巴威的技术资料，以及大量国内外最新的百万机组资料，并经过华能玉环电厂、国电泰州电厂、皖能铜陵电厂、国华绥中电厂、华润广西贺州电厂、国华徐州电厂、国电谏壁电厂、浙能台州电厂、江苏新海电厂、浙能嘉兴电厂、浙能舟山六横电厂、华电句容电厂、华能南通电厂等十几家百万千瓦发电机组企业培训使用，最终逐步修改、完善而成。本套丛书注重理论联系实际，紧密围绕设备型号进行讲解，是超超临界火电机组上岗、在岗、转岗、技能鉴定、继续教育通用培训的优秀教材。

本套丛书由上海电力学院副院长姚秀平教授担任编委会主任，现皖能集团总工程师倪鹏（原皖能铜陵发电有限公司总经理）、皖能铜陵发电有限公司总经理刘长生担任编委会副主任，上海电力学院华东电力继续教育中心和皖能铜陵发电有限公司负责组织校内 18 位长期从事培训工作的教师和 10 位专工联合编写，历时近 3 年，历经多次修改而成。

本套丛书在编写过程中，中国上海电气集团公司、华东电力设计院、国华宁海发电有限公司、国电北仑发电有限公司、中电投上海漕泾发电有限公司、外高桥第三发电有限公司、浙能嘉兴发电有限公司、国电泰州发电有限公司、浙能舟山六横煤电有限公司等提供了大量的技术资料并给予了大力的支持和热情帮助；上海电力学院成教院杨俊保副院长、培训科肖勇科长、司磊磊老师以及多位研究生为本丛书的出版做出了大量细致工作，在此表示诚挚的感谢。

本册为《锅炉分册》，全书共十五章，全书由章德龙编写，现场技术资料由王云刚、缪加庆提供。

本分册在编写过程中，参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及相关电厂、制造厂、设计院等的技术资料、说明书、图纸等。在此一并表示衷心感谢。

由于知识和经验有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者提出宝贵意见，以利不断完善。

**编者**

2013 年 6 月



# 目 录

## 前言

<b>第一章 1000MW 超超临界直流锅炉总体介绍</b> .....	1
第一节 超临界锅炉发展状况 .....	1
第二节 国内 1000MW 超超临界直流锅炉结构特性 .....	8
<b>第二章 1000MW 超超临界直流锅炉水冷壁</b> .....	42
第一节 超超临界直流锅炉水冷壁的结构特性 .....	42
第二节 临界压力以上水蒸气的基本特性 .....	64
第三节 超临界直流锅炉水冷壁的膜态沸腾（传热恶化） .....	67
第四节 超临界压力直流锅炉水冷壁的水动力特性 .....	73
第五节 超超临界直流锅炉水冷壁的热偏差 .....	77
第六节 超临界压力直流锅炉的汽水工况 .....	82
<b>第三章 超超临界直流锅炉的启动旁路系统</b> .....	88
第一节 临界压力以上直流锅炉启动旁路系统的型式及特性 .....	88
第二节 1000MW 超超临界直流锅炉启动旁路系统 .....	93
<b>第四章 过热器与再热器</b> .....	102
第一节 过热器、再热器系统和结构特性 .....	102
第二节 汽温特性 .....	120
第三节 超临界直流锅炉过热汽温调节 .....	122
第四节 再热汽温调节 .....	130
第五节 过热器、再热器的热偏差 .....	137
第六节 超临界及超超临界使用金属材料特点 .....	142
<b>第五章 制粉系统</b> .....	148
第一节 煤粉性质及煤的可磨性系数 .....	148
第二节 HP1163 碗式中速磨煤机 .....	151
第三节 MPS（ZGM）中速磨煤机 .....	160
第四节 双进双出钢球磨煤机 .....	176
第五节 给煤机 .....	182
第六节 制粉系统及其运行 .....	196

<b>第六章 燃烧设备</b> .....	226
第一节 煤粉气流的着火及燃烧特性.....	226
第二节 煤粉燃烧设备.....	235
第三节 直流式煤粉燃烧器.....	245
第四节 旋流式煤粉燃烧器.....	279
第五节 点火煤粉燃烧器及点火装置.....	299
第六节 火焰检测器.....	317
<b>第七章 结渣、腐蚀及低 NO<sub>x</sub> 技术</b> .....	329
第一节 炉膛结渣.....	329
第二节 高温腐蚀.....	340
第三节 低 NO <sub>x</sub> 燃烧技术 .....	345
第四节 烟气脱硝装置.....	356
<b>第八章 空气预热器</b> .....	367
第一节 概述.....	367
第二节 容克式空气预热器结构特性.....	371
第三节 空气预热器漏风控制系统 LCS .....	388
第四节 空气预热器运行.....	395
第五节 回转式空气预热器低温腐蚀和积灰.....	398
<b>第九章 送、引风机及一次风机</b> .....	406
第一节 概述.....	406
第二节 轴流风机结构特性.....	412
第三节 轴流风机性能特性曲线.....	425
第四节 轴流风机的旋转脱流与喘振.....	432
第五节 风机运行.....	438
<b>第十章 锅炉阀门</b> .....	452
第一节 阀门一般知识.....	452
第二节 闸阀与截止阀.....	454
第三节 调节阀.....	456
第四节 电磁泄压阀.....	463
第五节 全启式弹簧安全阀.....	466
第六节 温控阀.....	475
第七节 机组旁路及叠形安全阀.....	476
<b>第十一章 吹灰装置</b> .....	486
第一节 吹灰器布置及系统.....	486
第二节 吹灰器结构.....	494



第三节	吹灰器运行	506
第四节	炉膛出口伸缩式烟温探针	513
<b>第十二章</b>	<b>除渣、除尘及除灰系统</b>	<b>519</b>
第一节	除渣系统	519
第二节	静电除尘器	532
第三节	除灰系统及其运行	539
<b>第十三章</b>	<b>1000MW 超超临界直流锅炉启动与停运</b>	<b>547</b>
第一节	超超临界直流锅炉启动特性	547
第二节	1000MW 超超临界直流锅炉冷态启动	554
第三节	热(温)态启动	581
第四节	超超临界直流锅炉停运	584
第五节	锅炉停运保养	590
<b>第十四章</b>	<b>超超临界直流锅炉运行调整</b>	<b>593</b>
第一节	直流锅炉的动态特性	593
第二节	汽温调节	595
第三节	主汽压力调节	603
第四节	燃烧调节	606
<b>第十五章</b>	<b>锅炉常见故障及处理</b>	<b>615</b>
第一节	综合性机组事故的预防以及处理	615
第二节	锅炉燃烧系统故障	622
第三节	锅炉汽水系统(受热面)故障	626
第四节	锅炉主要辅机事故处理及预防	632
<b>参考文献</b>		<b>649</b>

# 第一章

## 1000MW 超超临界直流锅炉总体介绍

### 第一节 超临界锅炉发展状况

#### 一、锅炉分类

##### (一) 按水冷壁循环方式分类

锅炉按水冷壁循环方式分类可分为自然循环锅炉、控制循环锅炉及直流锅炉。锅炉中省煤器内工质为水，省煤器内水的流动是依靠给水泵压头，过热器内工质为过热蒸汽，过热蒸汽的流动也是依靠给水泵压头，因此，省煤器过热器内工质流动，不论任何形式锅炉，均为强制流动。

##### 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，下降管、水冷壁以及相应的联箱。当水在水冷壁受热后，部分水会变成汽泡和蒸汽，所以水冷壁中的工质为汽水混合物。因此，自然循环锅炉水冷壁内工质流动是依靠下降管中水与水冷壁（上升管）中汽水混合物的密度差流动。此流动力也称为运动压头。当水冷壁受热量增加时，其产汽量就会增加，水冷壁内的汽水混合物的密度减少，则水与汽水混合物的密度差会增加，运动压头增加，循环推动力会增加，会促使循环回路流量增加。因此，自然循环锅炉水冷壁内工质流动特性是吸热大管，流量大，吸热小管，其流量小，即为自然循环流动特性，这有利于水冷壁管工作的安全性。在自然循环锅炉中，单位时间内的循环水流量与生成蒸汽量之比，称为循环倍率  $K$ ，即  $K = G/D$ ， $G$  为循环水量， $D$  为水冷壁出口蒸汽量。

##### 2. 控制循环锅炉

在循环回路的下降管中加装炉水循环泵，该型锅炉的水冷壁内工质流动力主要依靠炉水循环泵的压头，当然也有自然循环的运动压头产生推动力，炉水循环泵压头与运动压头之比约为 4:1，因此，这种锅炉水冷壁内工质流动为强制流动，而强制流动属于阻力流动，其流动特性为吸热大管，流量小，而吸热小管，流量大，这样水冷壁出口各管的热偏差就大，为此在水冷壁入口必须装置节流孔圈。节流孔圈装置原则为吸热大管，节流孔圈直径大、流量大；吸热小管，节流孔圈直径小，流量小。这样各水冷壁管按热负荷大小合理分配流量。

该种锅炉早期的水冷壁采用光管，也称强制循环汽包炉，为防止水冷壁产生膜态沸腾，要求锅炉的循环倍率  $K$  必须大于 3.5，并且采用三台炉水循环泵，不设置备用。以后采用改进型控制循环锅炉，即水冷壁在高热负荷区采用内螺纹管，可以防止膜态沸腾，因此循环倍率可以降低到 1.8~2.0，这样仍采用三台炉水循环泵，但两台炉水循环泵可以满足 BMCR

的要求，一台炉水循环泵作为备用。目前该锅炉均采用这种型式，运行中采用三台炉水循环泵运行，即运行中备用，也可以两台炉水循环泵运行。如果两台炉水泵运行，其循环倍率为 1.8~2.0；如果三台炉水循环泵运行，在 BMCR 工况下，循环倍率可达到 2.7。

### 3. 直流锅炉

直流锅炉没有汽包，工质水一次通过加热，蒸发、过热，变为过热蒸汽，即循环倍率为 1。直流锅炉的另一特点，其加热、蒸发，过热没有固定的分界点，水在省煤器，水冷壁，过热器连续流动变为过热蒸汽。整个流动阻力均由给水泵来克服，也即水冷壁内工质流动力由给水泵压头来提供。

#### (二) 按蒸汽参数分类

锅炉按蒸汽参数分类，有低压锅炉（过热器出口蒸汽压力 $<1.3\text{MPa}$ ），中压锅炉（过热器出口蒸汽压力一般为 $4.5\sim 5.0\text{MPa}$ ），高压锅炉（过热器出口蒸汽压力为 $9\sim 10\text{MPa}$ ），超高压锅炉 [过热器出口蒸汽压力为 $14\text{MPa}$ ，（ $125\text{MW}$ 、 $200\text{MW}$ ）]，亚临界压力锅炉 [过热器出口蒸汽压力为 $17\sim 18\text{MPa}$ ，（ $300\text{MW}$ 、 $600\text{MW}$ ）]，超临界压力锅炉（过热器出口蒸汽压力为 $25.4\text{MPa}$ ）。

所谓超超临界压力锅炉要求过热器出口蒸汽压力 $>27\text{MPa}$  或过热器及再热器出口蒸汽汽温 $>580^\circ\text{C}$ 。目前国内的超超临界锅炉压力在 $26\sim 27\text{MPa}$ ，而温度均超过 $580^\circ\text{C}$ ，即过热器出口汽温为 $605^\circ\text{C}$ ，再热器出口汽温为 $603^\circ\text{C}$ 。

(1) 压力提高，汽轮机末几级叶片湿度增加，为了降低汽轮机末几级叶片湿度，超高压以上机组采用再热。另外，采用再热可以提高机组经济性，即可提高机组循环热效率。

(2) 在压力提高的同时，蒸汽温度也相应提高，机组循环热效率也相应提高。

汽压在 $16\sim 31\text{MPa}$ ，汽温在 $535\sim 600^\circ\text{C}$ 范围，汽压每上升 $1\text{MPa}$ ，电厂热耗下降 $0.18\%\sim 0.29\%$ ；汽温每升高 $10^\circ\text{C}$ ，电厂热耗下降 $0.24\%\sim 0.36\%$ ；当再热由一次再热增加到二次再热，电厂热耗下降 $1.7\%\sim 2.4\%$ 。在超超临界条件下，主汽压力每上升 $1\text{MPa}$ ，电厂热耗下降 $0.13\%\sim 0.15\%$ ；主汽温度每上升 $10^\circ\text{C}$ ，电厂热耗下降 $0.25\%\sim 0.30\%$ ；再热汽温每上升 $10^\circ\text{C}$ ，电厂热耗下降 $0.15\%\sim 0.20\%$ 。

亚临界，一次中间再热机组（ $17\text{MPa}$ ， $538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ —汽轮机进口蒸汽参数），电厂循环热效率约为 $37\%$ ； $24\text{MPa}$ ， $538^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ 超临界机组电厂循环热效率可达 $40\%$ ； $31\text{MPa}$ ， $566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ 二次中间再热超超临界机组，电厂循环热效率为 $44\%$ ； $35\text{MPa}$ ， $649^\circ\text{C}/593^\circ\text{C}/593^\circ\text{C}$ 机组电厂循环热效率可达 $47\%$ 。

#### (三) 按燃烧方式分类

从目前电站锅炉来说，主要是煤粉炉与循环流化床锅炉。循环流化床锅炉燃用直径 $<13\text{mm}$ 的煤粒，炉膛温度为 $850\sim 950^\circ\text{C}$ ，炉膛温度低，是低温的动力燃烧，炉内的大量固体颗粒与空气强烈混合，燃烬率很高，性能良好的循环流化床锅炉燃烧效率可达 $98\%\sim 99\%$ 。炉膛温度 $850\sim 900^\circ\text{C}$ 是脱硫的最佳温度，在脱硫剂合理化学当量比（钙硫比）条件下，可以达到 $90\%$ 的脱硫效率。但目前采用大容量循环流化床，还存在不少困难，诸如金属材料、受热面磨损，大容量锅炉过热器、再热器的布置等问题。

煤粉锅炉是电站锅炉的主要型式，目前其燃烧火焰的形式有四角切圆燃烧，墙式布置对冲燃烧以及 W 型火焰等。切圆燃烧是煤粉气流从布置在炉膛四角的直流燃烧器引入炉膛进

行燃烧方式。它的主要特点，四角煤粉射流相互引燃，着火工况好，在炉内形成强旋流火炬燃烧，炉内扰动混合强烈，有利于煤粉的燃尽；但是对于大容量四角切圆燃烧锅炉，其炉膛出口气流存在残余扭转，容易产生水平烟道高温过热器，高温再热器左右流动偏差，左右烟温偏差，导致左右汽温偏差，对过热器、再热器安全不利，在设计中必须采取一定改善措施。

前后墙布置的旋流燃烧器，形成对冲火焰的燃烧方式，炉内火焰充满情况较好，火焰在炉膛中部对冲，有利增强扰动混合，上部炉膛沿宽度方向上的烟气温度和烟速分布比较均匀，水平烟道左右汽温偏差较小。但从投运大容量锅炉采用墙式对冲燃烧，燃用低熔点煤时，有出现结渣问题。因此旋流燃烧器锅炉除采用较低炉膛容积热负荷和炉膛截面热负荷之外，燃烧器的选型，结构、燃烧器的布置可能起着相当重要的作用。

W 型火焰的燃烧方式是将直流或弱旋流式燃烧器布置在燃烧室前后墙的炉拱上，使火焰开始向下，再折回向上，在炉内形成 W 型火焰。煤粉着火燃烧主要在下炉膛进行，而上炉膛为燃尽区及烟气冷却。W 型火焰下炉膛温度高对着火有利，火焰行程长，提高燃烬率。W 型火焰燃烧方式对难着火燃烧的贫煤及无烟煤在着火、燃烧稳定性以及燃烬率优于四角切圆及墙式对冲的燃烧方式。

## 二、直流锅炉特点及类型

### (一) 直流锅炉的特点

(1) 直流锅炉不受工质压力限制，它可适用于任何压力。由于临界压力以上，没有蒸发段，在相变点的汽水密度一样，汽水无法分离，因此不能用汽包锅炉。对于临界压力以上锅炉只能采用直流锅炉。

(2) 直流锅炉没有汽包，锅炉本体金属消耗量少，而且为达到水冷壁内工质较高质量流速  $\rho\omega$ ，其水冷壁管径小于汽包炉。这样同样容量锅炉，直流锅炉耗用金属量比汽包炉少，而且省去了汽包的制造工艺，锅炉制造成本降低。

(3) 直流锅炉水冷壁内工质流动是依靠给水泵压头，因此直流炉水冷壁可以自由布置，可采用螺旋管圈或垂直管屏水冷壁。由于省煤器、水冷壁、过热器的阻力全由给水泵来克服，要求给水泵出口压头高，提高了制造成本和运行费用。

(4) 由于直流锅炉没有汽包以及采用较小水冷壁管径，因此锅炉储热能力小，即热惯性小。这样一方面使机组启停速度提高，适宜机组调峰要求，另一方面热惯性小，控制调节要求高。

(5) 直流锅炉由于没有汽包，没有排污，加药，因此给水带入锅炉的盐类，除少量沉积在锅炉水冷壁外，大部分盐类溶解在蒸汽中，带入汽轮机。因此直流锅炉给水品质要求高，要求凝结水进行除盐处理。

(6) 为了确保启动初期水冷壁的冷却，直流锅炉均要采用一定的启动流量（如 30% BMCR），即为最低质量流速  $\rho\omega$ 。因此，直流锅炉必须要设置启动旁路系统，回收疏水，不允许水进入过热器及主蒸汽管。

(7) 由于直流锅炉的水冷壁入口为水，而出口为过热蒸汽（或微过热蒸汽），对水冷壁安全工作不利。在低于临界压力范围内可能出现膜态沸腾，在超临界压力范围内可能出现膜态沸腾。对于强制流动水冷壁还会出现工质流动不稳定性等。

(8) 对于超临界或超超临界锅炉, 锅炉用钢, 碳钢比例明显低于汽包炉。水冷壁管采用低合金钢比例大幅增加。由于过热汽温、再热汽温采用  $571^{\circ}\text{C}$ ,  $569^{\circ}\text{C}$  或  $605^{\circ}\text{C}$ ,  $603^{\circ}\text{C}$ , 过热器, 再热器受热面采用奥氏体钢比例增大, 制造成本明显上升。

## (二) 直流锅炉水冷壁型式

### 1. 水平围绕管圈式 (拉姆辛式)

水冷壁由许多平行的管子组成管带, 然后呈水平或微倾斜地自下向上沿炉膛四周内壁盘旋上升, 显然为了盘旋上升必须至少有一个墙上的水冷壁是倾斜布置的。具体型式有: 一个墙上为倾斜布置而其余三个墙上为水平布置 (也叫水平阶梯式); 两个墙上为倾斜布置而另两个墙上为水平布置 (也叫螺旋阶梯式), 原国产早期直流炉 SG-220-100 型和 SG-400-140 型直流锅炉的水冷壁都采用这种型式, 用于较小容量的直流锅炉。

### 2. 本生式直流锅炉

本生式直流锅炉的水冷壁由上升管屏组成, 它有以下几种型式:

(1) 多次串联垂直上升管屏。水冷壁由若干垂直管屏组成, 每个管屏由几十根并联的水冷壁管及上下两端的中间联箱组成, 每管屏之间用 2~3 根不受热的下降管连接, 使它们串联起来。德国的本生型直流锅炉最早采用这种结构型式。随着锅炉容量增加、为达到质量流速  $\rho\omega$  的要求, 串联管屏数可以减少。

(2) 一次垂直上升管屏。一次垂直上升管屏, 又称通用压力型, 即 UP 型, 由于锅炉容量增大, 炉膛周界相对减小, 使炉膛水冷壁做成一次垂直上升, 又能保证管内工质的质量流速仍有足够大。为了减少一次垂直上升水冷壁管的热偏差, 在上升过程中进行 2~3 次中间混合。这种型式的优点是水冷壁可以做成组合件, 金属消耗少, 采用整焊膜式壁结构及全悬吊结构。但它只在大容量锅炉中采用, 一般用于 600MW 以上的锅炉。过去国内制造 300MW 直流锅炉采用一次垂直上升管屏, 由于容量小, 为保证水冷壁管内质量流速, 所以水冷壁管径太小 (管径为  $\phi 22\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ ), 使管内流量小, 不但影响水冷壁刚度而且产生管间温差增大, 并且限制变负荷运行。

(3) 螺旋管圈式管屏。螺旋管圈可以改变螺旋管的倾斜角度, 来满足水冷壁管内工质的质量流速要求。同样容量, 螺旋管的倾斜角度减少, 螺旋管圈流通面积减少 (如管子管径不变), 质量流速  $\rho\omega$  会增加 ( $\rho\omega = G/F$ ), 因此可有足够高质量流速来防止膜态沸腾发生。

对于大容量直流锅炉, 炉膛下部辐射区为螺旋管圈, 而在炉膛上部辐射区则采用垂直上升管屏, 这样便于采用悬吊式炉膛水冷壁。螺旋管圈承受荷重能力比较差, 但各管受热比较均匀, 对炉膛内燃烧变化的敏感性差, 螺旋管圈不需装设中间混合集箱, 可以变压运行。而螺旋管圈承重悬吊受力于上部垂直水冷壁。目前国内超临界, 超超临界直流炉炉膛折焰角以下水冷壁采用螺旋管圈, 折焰角及以上区域采用垂直上升管屏。

还有一种水冷壁布置是炉膛下辐射区布置 2~3 次串联上升管屏, 而在炉膛上部辐射区则布置一次垂直上升管屏, 这种型式又叫 FW 型, 国内没有采用这种型式的直流炉。

## 三、超临界锅炉技术发展状况

追求发电机组的高效率、低污染是世界各国共同的发展目标。对于以矿物燃料为主要能源的国家, 节约能源、高效利用能源、降低煤耗, 也是减少污染物排放量的重要途径之一。虽然发展高效超临界机组需要增加发电机组的投资成本, 但综合考虑提高运行经济性带来的经济效



益和降低污染物处理的设备成本以及运行费用等因素，尤其是在符合可持续发展的能源和环境保护的目标方面，意义显然是深远而又重大的。工程热力学将水的临界状态点的参数定义为：压力为 22.11MPa，374.15℃。当水的状态参数达到临界点时，在饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽、水共存的二相区存在。与较低参数的状态不同，这时水的传热和流动特性等也会存在显著的变化。当水蒸气参数值大于上述临界状态点的压力和温度值时，则称其为超临界参数。而超超临界参数的概念实际为一种商业性的称谓，以表示出发电机组具有更高的压力和温度，因此各国、甚至各公司对超超临界参数的开始点定义也有所不同，例如：日本的定义为压力大于 24.2MPa，或温度达到 593℃；丹麦的定义为压力大于 27.5MPa；西门子公司的观点是应从材料的等级来区分超临界和超超临界机组等。《中国电力百科全书》则将超超临界定义为：蒸汽参数高于 27MPa。综合以上观点，一般将超超临界机组设定在蒸汽压力大于 28MPa，蒸汽温度高于 580℃的范围。图 1-1 是超超临界蒸汽循环对热效率的提高情况。

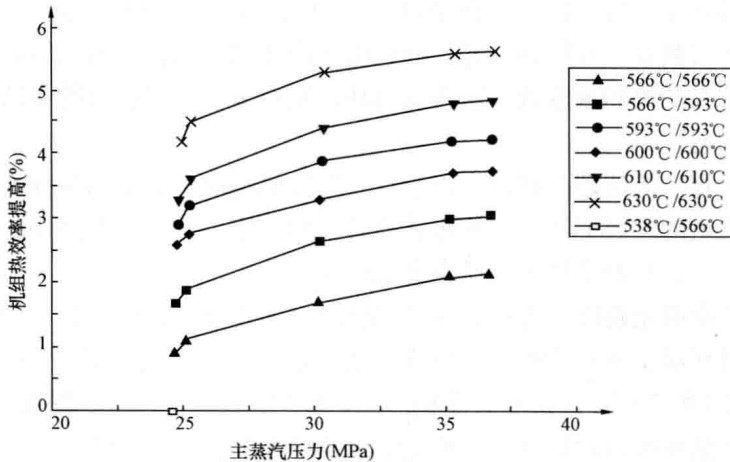


图 1-1 超超临界蒸汽循环对热效率的提高

### 1. 世界上超临界及超超临界参数锅炉的发展情况

从 20 世纪 50 年代开始，世界上以美国和德国等为主的工业化国家就已经开始了对超临界和超超临界发电技术的研究。经过半个世纪的不断进步、完善和发展，目前超临界和超超临界发电技术已经进入了成熟和商业化运行的阶段。

世界上超临界和超超临界发电技术的发展过程大致可以分成三个阶段：

第一个阶段，是从 20 世纪 50 年代开始，以美国和德国等为代表。当时的起步参数就是超超临界参数，但随后由于电厂可靠性的问题，在经历了初期超超临界参数后，从 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。直至 80 年代，美国超临界机组的参数基本稳定在这个水平。

第二个阶段，大约是从 20 世纪 80 年代初期开始。由于材料技术的发展，尤其是锅炉和汽轮机材料性能的大幅度改进，及对电厂水化学方面认识的深入，克服了早期超临界机组所遇到的可靠性问题。同时，美国对已投运的机组进行了大规模的优化及改造，可靠性和可用率指标已达到甚至超过了相应的亚临界机组。通过改造实践，形成了新的结构和新的设计方法，大大提高了机组的经济性、可靠性、运行灵活性。期间，美国又将超临界技术转让给日



本 (GE 向东芝、日立、西屋向三菱), 联合进行了一系列新超临界电厂的开发设计。这样, 超临界机组的市场逐步转移到了欧洲及日本, 涌现出了一批新的超临界机组。

第三个阶段, 大约是从 20 世纪 90 年代开始进入了新一轮的发展阶段。这也是世界上超超临界机组快速发展的阶段, 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。其主要原因在于国际上环保要求日益严格, 同时新材料的开发成功和常规超临界技术的成熟也为超超临界机组的发展提供了条件。主要以日本(三菱、东芝、日立)、欧洲(西门子、阿尔斯通)的技术为主。这个阶段超超临界机组的技术发展具有以下三方面的特点:

(1) 蒸汽压力取得并不太高, 多为 25MPa 左右, 而蒸汽温度取得相对较高, 主要以日本的技术发展为代表。近期欧洲及日本生产的新机组, 大多数机组的压力保持在 25MPa 左右, 蒸汽温度均提高到了 580~600℃。

(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。主要以欧洲的技术发展为代表, 在采用高温的同时, 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, 压力提高某一等级后, 必须采用更高的再热温度或二次再热循环。近年来, 提高压力的业绩主要来源于欧洲和丹麦一些设备制造厂家。

(3) 开发更大容量的超超临界机组以及百万等级机组倾向于采用单轴方案。为尽量减少汽缸数, 大容量机组的发展更注重大低压缸的开发和应用。日本几家公司和西门子、阿尔斯通等在大功率机组中已开始使用末级钛合金长叶片。

为了发展高效率的超超临界机组, 从 20 世纪 80 年代开始美国、日本和欧洲都投入了大量财力和研究人员开展了各自的新材料研发计划, 这些材料分别针对不同参数级别的机组, 如 593℃ (包括欧洲的 580℃ 机组和日本的 600℃ 机组) 级别、620℃ 级别、650℃ 级别和正在研发之中的更高温度级别的机组。新开发的耐热材料在投入正式使用之前进行了大量的实验室和实机验证试验。到目前为止欧洲已经成功投运了主汽温度为 580℃ 的超超临界机组, 日本投运了主汽温度为 600℃ 的机组, 从材料的实机验证结果来看, 国际上目前成熟的材料已经可以用于建造 620℃ 的机组, 而据日本最新的报道称已经可以提供 650℃ 机组所需的关键部件材料。据统计, 目前全世界已投入运行的超临界及以上参数的发电机组大约有 600 多台。其中在美国有 170 多台, 日本和欧洲各约 60 台, 俄罗斯及原东欧国家 280 余台。目前发展超超临界技术领先的国家主要是日本、德国和丹麦等。

## 2. 国外研究计划

材料的发展水平决定了不同时期的火电站的运行参数。20 世纪 70 年代能源危机的出现和电力市场竞争的加剧导致了 80 年代初开始的一系列发展超临界和超超临界发电技术的合作研究和发 展计划。

为进一步降低能耗和减少污染物排放, 改善环境, 在材料工业发展的支持下, 超临界机组正朝着更高参数的超超临界的技术方向发展。目前在超临界机组中容量最大的已达到 1300MW, 效率最高的已达到 49%, 充分显示了超临界和超超临界技术的成熟性和推广前景。国外超超临界机组参数发展的近期目标主汽压力为 31MPa, 蒸汽温度为 620℃, 并正在向更高参数的水平发展。一些国家和制造厂商已经公布了下一代高效超临界机组的计划, 主汽温度将提高到 700℃, 再热汽温达 720℃, 相应的主汽压力将从目前的 30MPa 左右提高到

35~40MPa。根据英国贸易工部对超临界蒸汽发电的预测,今后5年内,超临界机组蒸汽温度将达到620℃。到2020年,蒸汽温度将达到650~700℃,循环效率可达到50%~55%。从1983年开始,欧洲实施了COST501计划和COST522计划,其目标分别是建29.4MPa/600℃/600℃、29.4MPa/600℃/620℃的机组和开发应用铁素体钢的蒸汽参数为29.4MPa/620℃/650℃的超超临界机组。

欧洲共同体最近几年来正在进行的“Theme700”计划的目的是论证和准备发展具有先进蒸汽参数的未来的燃煤电厂型式,其中关键部件将采用镍基高温合金。“Theme700”计划的目标是使下一代超超临界机组的蒸汽参数达到37.5MPa/700℃/700℃,从而效率可达52%~55%(对海水冷却方式可达55%,对内陆地区和冷却塔方式可达52%),使温室气体CO<sub>2</sub>的排放降低15%,并降低燃煤电厂投资。该计划预期在2014年完成,能否实现上述目标取决于技术方面的发展。

从2002年开始,美国能源部开始了一个用于燃煤电厂超临界和超超临界机组的高温高强度合金材料研究项目(VISION21计划的一部分)。主要研究用于燃煤电厂超临界和超超临界机组的高温高强度合金材料,以增强美国锅炉制造业在国际市场中的竞争力。该研究项目的五个主要目标是:

确定哪些材料影响了燃煤电厂的运行温度和效率;

定义并实现能使锅炉运行于760℃的合金材料的生产、加工和涂层工艺;

参与ASME认证过程并积累数据为成为ASME规范批准的合金材料做好了基础工作;

确定影响运行温度为671℃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。

日本电力(J-Power,原为EPDC)在日本通商产业省支持下,从政府得到50%的补助金,与其他单位共同组织超超临界技术的开发。第一阶段目标:第一步用铁素体钢达到593℃,第二步用奥氏体钢达到649℃。第二阶段目标:用新型铁素体钢达到630℃。日本三大设备制造公司对转子、汽缸、法兰、螺栓等主要部件进行了相应参数下的实物中间试验,50MW功率的中间实验机组已经投运。

### 3. 我国超临界及超超临界发展状况

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及至整个国民经济发展的的重要因素。

我国自上海锅炉厂引进CE公司技术制造出第一台超临界600MW机组以来,已经陆续由三大公司引进国外先进技术600MW级超临界机组制造出多台600MW超临界机组,并已经掌握了全部的制造技术,现三大公司又陆续引进国外先进超超临界技术生产1000MW级机组,其中上海锅炉厂引进ALSTOM技术(Ⅱ型锅炉、塔式锅炉)、哈尔滨锅炉厂引进日本三菱公司技术(单炉膛、双火球、双切圆Ⅱ型锅炉)、东方锅炉厂引进日本日立公司技术(单炉膛、对冲燃烧Ⅱ型锅炉)。

现华能玉环电厂、外高桥电厂和邹县电厂等1000MW机组已经运行多年,这些电厂采用605/603℃的主再热蒸汽温度,锅炉效率93.88%,发电煤耗270.6g/kWh,供电煤耗

283.2g/kWh, 整厂的循环效率已经达到 43.4%。可见机组的整组效率已经得到相当大的提高, 这些机组的投产为超超临界机组的发展积累了很好的制造和运行经验, 以后机组的发展方向将主要向高参数的超临界、超超临界机组发展。

## 第二节 国内 1000MW 超超临界直流锅炉结构特性

目前国内具有制造超超临界锅炉能力的锅炉厂有四家, 即哈尔滨锅炉厂有限责任公司(简称哈尔滨锅炉厂)、上海锅炉厂有限公司(简称上海锅炉厂)、东方锅炉(集团)股份有限公司(简称东方锅炉厂)和北京巴布科克·威尔科克斯有限公司(简称北京巴威)。其技术合作方式见表 1-1。

表 1-1 我国锅炉制造厂技术合作方式

序号	制造厂	技术支持方	合作方式
1	哈尔滨锅炉厂	三菱重工 (MHI)	哈锅引进 MHI 技术, 由 MHI 进行基本设计, 逐步由哈锅自主设计
2	上海锅炉厂	阿尔斯通公司 (ALSTOM)	技术转让, ALSTOM 负责锅炉基本设计, 并为上锅作性能保证
3	东方锅炉厂	巴布科克日立公司 (BHK)	东方日立 (BHDB) 是东锅和 BHK 的合资公司。该项目是由 BHK 负责基本设计
4	北京巴威	美国巴布科克·威尔科克斯公司 (B&W)	北京巴威是美国 B&W 在中国的合资公司, 采用 B&W 技术

### 1. 锅炉主要设计参数

根据我国对超超临界机组的技术认证, 推荐超超临界汽轮机进口参数为 25MPa、600℃/600℃, 相应锅炉的设计参数为 26.25MPa、605℃/603℃。但是, 由于上海汽轮机厂汽轮机进口参数选用 26.25MPa、600℃/600℃的方案, 因此, 与上海汽轮机厂配套的锅炉其主蒸汽压力将有所提高, 约 27.5MPa 左右。

锅炉蒸发量的选取一般与汽轮机的 VWO 工况相匹配。

### 2. 锅炉的总体形式

国内制造的 1000MW 超超临界锅炉有四种炉型(见表 1-2)。

- (1) 哈尔滨锅炉厂——单炉膛八角切圆燃烧—垂直管圈水冷壁—II 型炉。
- (2) 上海锅炉厂——单炉膛八角切圆燃烧—螺旋管圈水冷壁—II 型炉。
- (3) 上海锅炉厂——单炉膛切圆燃烧—螺旋管圈水冷壁—塔式炉。
- (4) 东方锅炉厂、北京巴威——单炉膛前后墙对冲燃烧—螺旋管圈水冷壁—II 型炉。

表 1-2 我国制造的 1000MW 超超临界锅炉炉型

项 目	哈尔滨锅炉厂	上海锅炉厂	上海锅炉厂	东方锅炉厂、北京巴威
锅炉炉型	II 型炉	II 型炉	塔式炉	II 型炉
燃烧方式	单炉膛八角切圆燃烧	单炉膛八角切圆燃烧	单炉膛四角切圆燃烧	单炉膛前后墙对冲燃烧