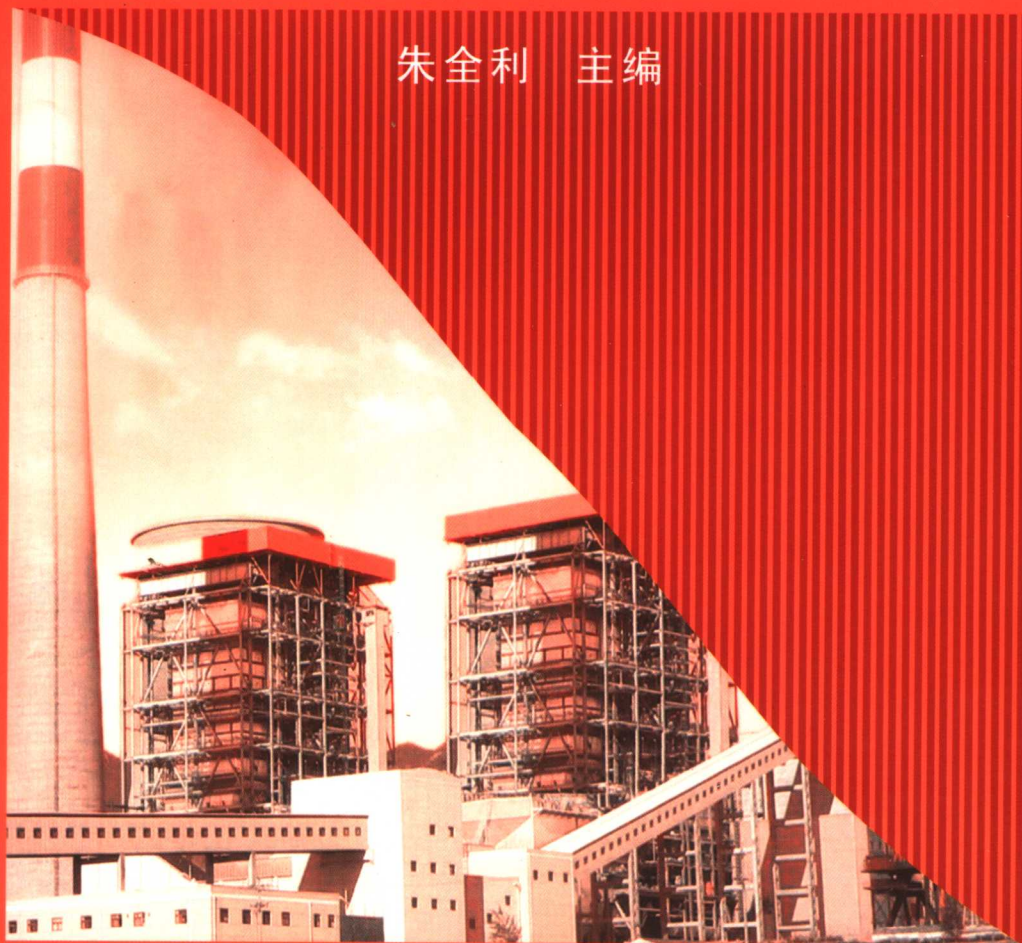


国产600MW超临界火力发电机组技术丛书

# 锅炉设备及系统



朱全利 主编



中国电力出版社

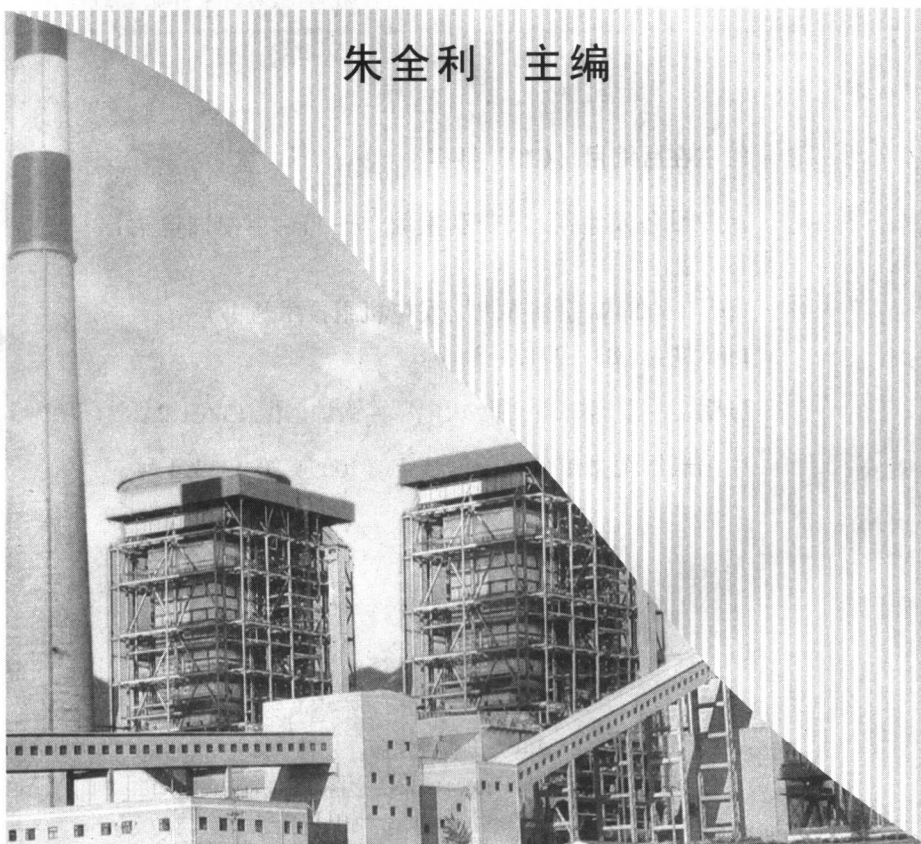
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

国产600MW超临界火力发电机组技术丛书

# 锅炉设备及系统

---

朱全利 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

本书是《国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书》的《锅炉设备及系统》分册。书中详细介绍了我国引进型 600MW 超临界锅炉的基本型式、构造和发展,超临界锅炉的水动力特性、热化学问题以及锅炉辅助设备及系统;详细地阐述了超临界锅炉的启停、运行调整、运行操作、故障处理等问题。

本书适合从事国产 600MW 超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,也可作为电厂生产人员的培训教材,亦可供有关专业人员以及高等院校相关专业师生参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备及系统/朱全利主编. —北京:中国电力出版社, 2006

(国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书)

ISBN 7-5083-3712-3

I. 锅... II. 朱... III. 火电厂-锅炉 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 133394 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 475 千字

印数 0001—3000 册 定价 33.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

## 作者简介：



朱全利，  
男，湖北  
武汉人，  
汉族，武  
汉大学副

教授，毕业于华中科技大学热能工程专业，获工学博士学位。主要从事电站锅炉高效低污染运行和燃烧理论与运用领域的科研、教学工作。获华中电力集团科学技术进步二等奖和湖南省科学技术进步一等奖。编写并出版教材四部，发表学术论文二十余篇，其中四篇被三大检索收录。

## 编 委 会

主 任：那希志

副主任：胡念苏 廖树荣 朱志飞 杨 俊 刘克兴

委 员：(以姓氏笔划为序)

毛慧和 王建梅 刘先斐 刘 勇 朱全利

陈启卷 陈志和 李正奉 李培元 肖大雏

肖志怀 张世荣 张恒良 金振齐 周柏青

周济波 郑桂波 胡念苏 顾 昌 袁立宏

盛赛斌 喻红梅 蔡 锴 熊立红 樊天竞

# 前 言

火力发电机组采用大容量和超临界参数是提高发电机组经济性的有效途径,已经被世界先进国家所广泛采用,我国也将超临界机组作为今后一个时期火电机组建设的重点之一。随着国民经济的快速发展和人民生活水平的提高,我国电力工业也正在以前所未有的速度发展,目前,一批国产超临界机组已经投产或正在兴建。这标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段,因此加快研究超临界机组制造和运行中的关键技术也就成了我国动力工作者面临一项极具现实意义的光荣任务。

为满足广大技术人员和现场生产人员了解国产 600MW 超临界火力发电机组的结构、运行、系统等知识的需要,我们组织人员编写了这套《国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《锅炉设备及系统》、《汽轮机设备及系统》、《电气设备及系统》、《控制设备及系统》、《电厂化学设备及系统》和《燃料运输设备及系统》等六个分册。

本丛书可供从事 600MW 超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材,也可供高等院校相关专业师生参考。

《锅炉设备及系统》分册是本丛书的第一分册。全书详细介绍了我国三大动力集团生产的引进型 600MW 超临界锅炉结构及系统、辅助设备的原理、结构、特性、运行、维护等,内容包括锅炉本体结构,锅炉的辅助设备,锅炉机组的运行等。

本分册由武汉大学朱全利主编,参加编写的人员有:武汉大学的朱全利(前言、第二章部分、第十、十一章)、刘勇(第一章、第四章)、金振齐(第二章部分、第九章)、顾昌(第三章)、喻红梅(第五、七、十二章)、熊立红(第六、八章)。

本分册由武汉大学唐必光教授担任主审,他对书稿进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此谨表示诚挚的谢意。

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、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等,

特别是在收集资料过程中得到华能沁北发电有限责任公司、大唐湖南湘潭发电有限责任公司、广东红海湾发电有限公司的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

**编者**

2005年6月

# 目 录

## 前 言

## 第一章 概述 ..... 1

- 第一节 超临界机组的热力工作过程 ..... 1
- 第二节 超临界机组的发展现状与趋势 ..... 2
- 第三节 超临界机组锅炉的技术特点 ..... 6
- 第四节 国产 600MW 超临界锅炉技术特点 ..... 8
- 第五节 超临界锅炉的工作原理和基本型式 ..... 14

## 第二章 燃料燃烧及燃烧设备 ..... 23

- 第一节 燃煤的成分及主要特性 ..... 23
- 第二节 点火及助燃用油 ..... 29
- 第三节 燃煤的着火及燃烧特性 ..... 32
- 第四节 燃煤的结渣和沾污特性 ..... 38
- 第五节 煤粉锅炉燃烧设备 ..... 45
- 第六节 旋流燃烧器 ..... 47
- 第七节 直流燃烧器 ..... 54
- 第八节 煤粉炉的点火装置 ..... 59
- 第九节 锅炉高效低  $\text{NO}_x$  燃烧技术 ..... 65

## 第三章 煤粉制备及设备 ..... 72

- 第一节 煤粉的性质 ..... 73
- 第二节 煤的可磨性系数 ..... 75
- 第三节 超临界机组常用的磨煤机 ..... 76
- 第四节 煤粉制备系统及主要部件 ..... 89

---

## 第四章 蒸发受热面 ..... 97

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....                | 97  |
| 第二节 锅炉受热面的管壁温度 .....        | 101 |
| 第三节 直流锅炉的水动力不稳定性 .....      | 105 |
| 第四节 直流锅炉蒸发受热面中流体的脉动 .....   | 111 |
| 第五节 直流锅炉蒸发受热面的热偏差 .....     | 113 |
| 第六节 超临界锅炉蒸发受热面的传热恶化现象 ..... | 115 |
| 第七节 国产 600MW 超临界锅炉水冷壁 ..... | 120 |

---

## 第五章 过热器和再热器 ..... 131

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....              | 131 |
| 第二节 过热器 .....             | 132 |
| 第三节 再热器 .....             | 139 |
| 第四节 汽温特性及汽温调节 .....       | 142 |
| 第五节 过热器的热偏差 .....         | 150 |
| 第六节 受热面沾污、高温腐蚀及高温损坏 ..... | 153 |

---

## 第六章 尾部受热面 ..... 157

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第一节 省煤器 .....   | 157 |
| 第二节 空气预热器 ..... | 159 |

---

## 第七章 超临界锅炉的热化学问题 ..... 183

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一节 锅内盐分的溶解与杂质的沉淀 ..... | 183 |
| 第二节 直流锅炉的锅内腐蚀 .....     | 188 |
| 第三节 直流锅炉的给水标准 .....     | 191 |
| 第四节 直流锅炉的水处理 .....      | 194 |
| 第五节 直流锅炉的清洗 .....       | 195 |

---

## 第八章 超临界锅炉用风机 ..... 199

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....             | 199 |
| 第二节 超临界锅炉送风机的参数及结构 ..... | 201 |

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| 第三节         | 超临界锅炉引风机 .....           | 218        |
| 第四节         | 超临界锅炉一次风机 .....          | 224        |
| <hr/>       |                          |            |
| <b>第九章</b>  | <b>超临界锅炉的启停 .....</b>    | <b>228</b> |
| 第一节         | 概述 .....                 | 228        |
| 第二节         | 超临界锅炉的启动特性 .....         | 229        |
| 第三节         | 超临界锅炉的启动旁路系统 .....       | 231        |
| 第四节         | 超临界锅炉的启动 .....           | 237        |
| 第五节         | 超临界锅炉的停炉和停用保护 .....      | 248        |
| <hr/>       |                          |            |
| <b>第十章</b>  | <b>锅炉的正常运行及调整 .....</b>  | <b>254</b> |
| 第一节         | 锅炉运行调整的任务 .....          | 254        |
| 第二节         | 直流锅炉状态参数特性 .....         | 255        |
| 第三节         | 直流锅炉蒸汽参数调节的原理 .....      | 258        |
| 第四节         | 超临界锅炉运行调节 .....          | 261        |
| <hr/>       |                          |            |
| <b>第十一章</b> | <b>锅炉常见故障及处理 .....</b>   | <b>275</b> |
| 第一节         | 受热面损坏 .....              | 275        |
| 第二节         | 锅炉灭火与烟道再燃烧 .....         | 281        |
| 第三节         | 锅炉事故处理规范 .....           | 284        |
| 第四节         | 锅炉典型事故解析 .....           | 290        |
| <hr/>       |                          |            |
| <b>第十二章</b> | <b>除灰除尘及压缩空气系统 .....</b> | <b>300</b> |
| 第一节         | 吹灰系统及运行 .....            | 300        |
| 第二节         | 除灰系统及运行 .....            | 306        |
| 第三节         | 除渣系统及运行 .....            | 310        |
| 第四节         | 静电除尘器 .....              | 313        |
| 第五节         | 空压机及压缩空气系统 .....         | 317        |
| <hr/>       |                          |            |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>             | <b>326</b> |

# 第一章 概述

## 第一节 超临界机组的热力工作过程

电站锅炉利用燃料燃烧释放的热能加热给水,以获得高温、高压的蒸汽。将高温、高压的蒸汽输送到汽轮机中,推动汽轮机转动,并带动发电机转动产生电能。火力发电厂能量转换的过程见图1-1,锅炉是火力发电厂三大主要设备之一。

锅炉中常用的工质是水,进入锅炉的水经过在锅炉受热面中吸收热量以后,转变成高温、高压的过热蒸汽。因此,水在锅炉中经历了预热、汽化、过热三个阶段。为了提高凝汽式发电机组的效率,避免排汽湿度太大,造成汽轮机的损坏,高压力火力发电机组都需对蒸汽进行再热。

我国发电装机总容量和发电量均居世界第二位。

我国的年发电量中,火电占80%以上,是我国主

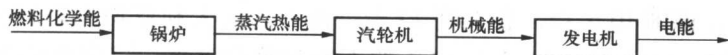


图1-1 火电厂燃料化学能转化成电能的过程

要的发电方式,并且是以煤作为发电主要燃料的。目前,我国燃煤电站存在的突出问题是:机组效率低,供电煤耗高,污染严重。

国产火力发电机组要提高经济性和热能利用效率,需要增大机组容量,并提高机组的参数。增大单机容量,可以降低机组每千瓦的投资,而提高机组的参数可以提高火力发电机组的效率。

自20世纪80年代中期我国引进国外较为先进的燃煤火力发电机组和生产技术以来,我国火力发电机组主要以300MW机组为主力机组,经过一段时间对这些先进的发电技术的消化和吸收,我国已能自行生产600MW燃煤火力发电机组。

发展先进的燃煤发电技术应考虑的问题是:效率、环保、可靠性、机动性、投资和废弃物的利用等。当前,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。其基本设计思想是:提高机组的发电效率,减少燃料的消耗,降低电价并减少有害物质的排放。高效超临界发电技术则是在技术已很成熟的传统燃煤超临界发电技术基础上进一步改善,采用更高的蒸汽初参数和先进的烟气脱硫脱硝技术。

超临界压力机组已是世界上一项比较成熟的技术,其效率比亚临界机组有大幅度提高,因而在同样发电量下,发电煤耗比亚临界机组低,排放的污染物比较少。加快建设和发展高效超临界火电机组是解决电力短缺、提高能源利用率和减少环境污染的最现实、最有效的途径。

按水循环方式分,锅炉可分为自然循环炉、多次强制循环炉、直流锅炉和复合循环炉。由于超临界压力下水与蒸汽的密度差很小,无法进行汽水分离,所以超临界参数锅炉不能采用带汽包的循环锅炉,只能采用直流锅炉或复合循环锅炉。鉴于 600MW 超临界机组采用复合循环经济性不高,所以 600MW 超临界锅炉通常采用直流锅炉。

## 第二节 超临界机组的发展现状与趋势

### 一、国内外超临界机组发展

#### 1. 国外超临界机组发展情况

早在 20 世纪 60 年代初,美国、俄罗斯和日本就开始发展超临界大型机组。超临界压力机组早期发展的蒸汽参数定在压力 25MPa,蒸汽温度(汽温)560℃左右。随着蒸汽压力(汽压)温度的提高,主要耐热材料提高了级别,系统辅机阀门全部更新。受当时工业制造水平的影响,直流锅炉的采用及其系统的复杂化,早期生产的超临界压力机组故障率很高,使其发展速度放慢。

20 世纪 80 年代以后,随着金属材料的进展,辅机及系统方面的成熟,超临界技术得以迅速发展。据不完全统计,目前,美国有 169 台超临界机组,俄罗斯 224 台,日本 94 台,德国 10 余台,意大利 13 台,南非、澳大利亚均有超临界机组。单机最大容量已达 1200~1300MW。经过 40 多年的不断完善和发展,目前超临界机组已进入成熟和实用阶段,超超临界参数的机组也已经成功地投入商业运行。

美国于 1957 年投运第 1 台 125MW 试验性的超临界参数机组(31MPa、621/566/538℃),由于初期直流锅炉采用了过高的蒸汽参数,超出当时的技术发展水平,使得机组在运行中暴露出许多问题,降低了机组运行可靠性水平。但以后陆续投运的机组中在降低了蒸汽参数后,情况有所好转。到 20 世纪 70 年代末,已有 100 多台超临界机组运行,占当时全部火电容量的 30%。1972 年投运了首台世界上单机容量最大的 1300MW 超临界机组,至 1994 年此类机组共投运 9 台。据统计,截止 1985 年,美国绝大多数超临界机组的主蒸汽参数为 24.13MPa、主蒸汽温度和再热蒸汽温度为 538~566℃。1990 年前后,超临界机组的温度和压力又趋于提高。

俄罗斯超临界机组的研制主要立足于国内自主开发。1963 年投运首台 300MW 超临界机组,其后所有 300MW 及以上的机组都采用超临界技术。迄今,基本上形成 300、500、800、1200MW 等 4 个容量等级,参数基本保持在 23.5MPa、540/540℃。超临界机组占火电容量 50% 以上,最大单机容量为 1200MW。目前俄罗斯的列宁格勒金属工厂和莫斯科动力学院又设计了新一代超临界参数机组,蒸汽参数为 30~32MPa、580~600/580~600℃,给水温度 300℃。当凝汽器压力为 3.4~3.6kPa 时,预计电站的效率为 44%~46%。

日本发展超临界机组虽然起步较晚(20世纪60年代中期),但发展快、收效大。其采取引进、仿制、创新的技术路线,与俄罗斯形成鲜明的对比。日本于1967年从美国进口首台600MW超临界机组,两年后仿制的同型机组就已投运;而1971年投运的600MW超临界机组则有效地利用了日本自己的技术。20世纪80年代以后,日本吸取了欧洲的经验,自行开发了能带中间负荷滑压运行的超临界直流锅炉。现在容量为450MW以上的机组均采用超临界参数,一般为24.1MPa、538/566℃,一次再热;少数机组采用24.1MPa、538/538℃或24.1MPa、538/552/566℃,二次再热。目前,日本超临界机组已占其火电容量的50%以上,最大单机容量为1000MW。而且开始向更高参数发展,蒸汽温度多在566~593℃的范围内。1989年日本投运了世界上第1台采用超超临界参数的川越电厂1号机组,其主蒸汽压力为31MPa,温度为566/566/566℃(二次再热)。

德国也是发展超临界技术最早的国家之一,但其单机容量较小。1956年参数为29.3MPa、600℃(无再热)的117MW超临界机组投运,1972年首台430MW(24.5MPa、535/535℃)超临界机组投运。德国近年来很重视发展超临界机组,目前最具有代表性的是1992年投运的斯道丁格电站5号机组,该机组容量为535MW,参数为26.2MPa、545/562℃,机组净效率可达43%。

丹麦NORDJYLLANDSVARKET电站1998年投运1台容量为400MW、29MPa、二次再热、主蒸汽和再热蒸汽温度为580/580/580℃的超临界机组,在凝汽器压力为2.1kPa时,机组效率高达47%。丹麦于2001年投运的1台超临界机组效率高达49%,这是目前世界上已知的超临界机组中运行效率最高的机组。

国际上通常把主蒸汽压力在28MPa以上和主蒸汽、再热蒸汽温度在580℃及其以上的机组定义为高效超临界(high efficiency supercritical)机组或先进超临界(advanced supercritical)机组。之所以这样定义是因为这个参数是锅炉、汽轮机只需使用现代超临界机组用钢上限,超过这个参数高温高压部件就必须采用改进或新开发的耐热钢种。

近10年来,高效超临界技术在日本和欧洲得到迅速发展,投运的高效超临界机组取得了良好的运行业绩,其经济性、可靠性和灵活性得到认可,代表了当代火力发电技术的先进水平,因而极大地增强了各国发展更先进的高效超临界技术的信心。在已投运的高效超临界机组中,单机容量除了丹麦的3台为400MW等级以外,其余均在700~1000MW之间。由于容量的进一步增大受到螺旋管圈水冷壁吊挂结构复杂化和管带过宽热偏差增大的限制,因此,1000MW被认为是螺旋管圈水冷壁单炉膛锅炉容量的上限。同时,单机容量的进一步增大还要受到汽轮机的限制。

日本最初投运的两台高效超临界机组,制造中仅仅提高了主蒸汽压力而未提高其温度,由于主蒸汽压力和温度不匹配,故采用两次再热以防汽轮机末级蒸汽湿度过高,两次再热虽是成熟的技术,但系统复杂。31.0MPa、566℃两次再热机组与24.1MPa、566℃一次再热相比,热效率提高3%。采用31.0MPa主蒸汽压力和两次再热,机组制造成本显著提高,缺乏市场竞争力。所以,近年来各公司都转为生产24.5MPa、600/600℃等级的高效超临界机组,其热效率仅比31.0MPa、566℃两次再热低0.5%,制造成本则大大降低。

欧洲高效超临界机组的发展也大致经历了这一过程。丹麦20世纪90年代末投运的2

台高效超临界机组, 采用了 29.0MPa、580℃ 的蒸汽参数, 两次再热。而欧洲在建中的高效超临界机组也都改为采用一次再热, 与日本不同的是主蒸汽压力和温度都进一步提高 (30.5MPa、580/600℃), 其热效率与 29.0MPa、580℃ 两次再热机组基本相同。应该说, 现已建成的高效超临界机组尚属过渡型, 随着材料技术的发展, 各国计划在未来 10~20 年间将开发蒸汽初参数更高的两次再热高效超临界机组, 并正在付诸实施。

## 2. 国内超临界机组发展情况

由于煤炭在一次能源结构中的主导地位, 决定了电力生产中以煤炭为主的格局。根据我国能源资源的特点, 煤炭在一次能源生产与消费中的比例将会长期保持在 75% 左右, 而且这一比重在将来的几十年内不会有根本性的变化。在中国电力工业中, 自 1990 年以来, 火电机组装机容量保持在 75% 左右。火电机组的发电量占总发电量的 80% 以上, 其中燃煤电站占总发电量的 76%。目前, 我国发电消耗的煤炭约占煤炭总产量的 40% 以上, 且这一比例还会逐年上升。

我国电力工业总体水平与国外先进水平相比有较大差距, 能耗高和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发展的的重要因素。因此, 在增产煤炭的同时, 必须更加重视节约发电用煤工作, 提高机组的热效率以实现节能降耗及降低污染物的排放。

国外在发展先进的大型超临界火电机组方面已经取得了很大进展, 技术日益成熟, 并被广泛应用, 取得了显著的节能和环保效益。为迅速扭转我国火电机组煤耗长期居高不下的局面, 缩小我国火电技术与国外先进水平的差距, 发展国产大容量的超临界火电机组是十分必要的。发展高效、节能、环保的超临界火力发电机组势在必行。

前几年国内引进的多台 300、500、600、800MW 等多台超临界火电机组均成功投运, 取得了一些重要的调试和运行经验。近几年来国内三大动力集团在电站设备设计和制造方面的技术、经验、能力和技术装备水平等都有了很大的进步和发展。所有这些, 都为加速我国大型超临界火电机组的研制步伐和实现批量生产, 提供了必要的条件和基础。

世界各国超临界机组的起步容量各有不同, 如俄罗斯定为 300MW, 日本定为 450MW。目前 600MW 级机组在技术上也属于成熟产品, 考虑到国内原有 5 个大电网对单机容量 600MW 的需求和国内已有亚临界 600MW 火电机组产品的实际情况 (有些配套可以通用), 我国发展超临界火电机组的起步容量定为 600MW; 从技术性、经济性以及机组配用材料方面考虑, 参数初步定为压力 24~25MPa、温度 538~566℃、一次再热。

超临界压力锅炉蒸发受热面 (水冷壁) 有垂直管屏和螺旋管圈两种形式。我国引进的俄罗斯的超临界压力锅炉均采用垂直管屏式水冷壁, 从瑞士与美国引进的锅炉下部炉膛采用螺旋管圈, 上部采用垂直管屏。垂直管屏式水冷壁结构简单, 螺旋管圈式水冷壁, 可满足各种炉膛尺寸, 适用于滑压运行。随着电网峰谷差的加大, 大型火电机组要参与电网调峰, 这时, 大容量超临界锅炉采用垂直管屏, 对调峰的适应性要差一些。我国现运行的俄罗斯造超临界锅炉水冷壁全部采用垂直管屏, 但俄罗斯国内运行的 800MW 超临界锅炉水冷壁大多采用螺旋管圈式。

超临界锅炉的总体布置形式有两种, 即倒 U 形和 T 形。倒 U 形布置是最常见的布置

形式,但随着锅炉容量的增大,炉膛宽度  $b$  增长的速度比锅炉容量  $D$  增长的慢,故  $b/D$  值随锅炉容量  $D$  增大而减少。另一方面,锅炉的蒸汽量和燃烧形成的烟气流速随锅炉容量增大而增加。这样对于大容量的锅炉容易造成过热器中蒸汽流速和烟气流速过高。如果把出口烟窗的高度增大来减小烟气流速,则会使烟气沿出口烟窗高度的热力和流动的不均匀性增大。锅炉的 T 形布置可以解决上述问题。它是在炉膛上部开两个出口烟窗,组成两个对流通烟道。这样就可解决对流通烟道中的布置困难和降低出口烟窗高度,但 T 形布置的锅炉占地面积大。

目前我国制造的国产引进型 300、600MW 亚临界压力机组绝大多数采用的是直流燃烧器切圆燃烧方式。切圆燃烧方式存在的主要问题是残余旋转加大,从而会造成炉膛出口以后受热面的热偏差增大。

我国引进的俄罗斯造超临界锅炉,采用了多种型式的磨煤机。中速磨煤机的煤种适应性虽然不如低速球磨机那样广泛,但在其适用的煤种范围,却比球磨机有重量轻、占地小、投资省、耗电低、金属磨耗低和噪声小等优点。因此,在煤种适宜的条件下,优先采用中速磨煤机是合理的,目前我国 300MW 及以上机组多数采用中速磨煤机,国产引进技术制造的中速磨煤机主要有 RP 型和 MPS 型,HP 型是 RP 型的改进型。

随着节约能源和保护环境的要求日益迫切,在我国大力发展超临界压力机组已成为当务之急。对超临界压力锅炉,将一次再热转为二次再热可提高效率 1.5%~2%。采用二次再热的主要问题是:系统复杂,受热面布置较困难;初投资增加;再热汽温调节复杂。

## 二、超临界火电技术的发展趋势

为进一步降低能耗和减少  $\text{CO}_2$  排放,改善环境,在材料技术发展的支持下,超临界机组正朝着更高参数的超超临界的方向发展。目前高参数的超临界机组已达到成熟、高效和商业化程度,其最大容量已达 1300MW,最高效率达 49%,具有极高的推广前景。超超临界机组技术也正趋于成熟,国外超超临界机组发展的近期目标为 1000MW 级机组,参数为 31MPa、600/600/600℃,并正在向更高的水平发展。一些国家和制造厂商已经公布了发展下一代超超临界机组的计划,蒸汽初温将提高到 700℃,再热汽温达 720℃,相应的压力也将从目前的 30MPa 左右提高到 35~40MPa,机组效率有望达到 50%~55%。

从原理上说,对于利用蒸汽循环发电的任何技术都可以采用超临界技术。因此,目前的 IGCC(整体煤气化联合循环发电)技术,FBC(流化床燃烧)技术,燃气轮机联合循环发电技术以及任何与余热锅炉有关的技术均可采用超临界技术。当然,为了达到商业上可行的目的,这类采用超临界参数的发电方式在技术上不仅要能产生高温蒸汽,同时还需具备一定的容量规模。据国外研究报告介绍,随着 FBC 和联合循环燃气轮机技术的进步,机组容量增加,余热锅炉的温度也相应提高,在今后的 5~15 年内,其超临界形式可能会实现商业化。据介绍,EDF 公司正在进行 600MW、蒸汽参数为 27MPa、600/600℃、给水温度为 290℃的超临界 CFB(循环流化床)锅炉的设计。同时,IGCC 采用超临界技术仍然是未来目标。

由于煤可以远距离运输,且能大量储存,在燃料供应上具有极好的安全保证,所以燃煤发电技术具有较强的优势。面向 21 世纪,对于燃用化石燃料,特别是燃煤机组,超临

界发电技术仍是一种重要的技术选择, 因此具有广阔的发展前景。

### 三、超临界火电机组技术国产化的关键

由于采用超临界参数, 对机组的设计、制造和运行技术等方面都提出了更高的要求 and 标准。因此带来了一些新的问题:

(1) 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, 锅炉传热、水动力、热偏差和动态特性, 汽轮机关键部件的结构设计与转子的冷却技术、汽流激振、固体颗粒侵蚀等。

(2) 火电技术在持续发展和技术进步过程中的一些共性问题, 如机组的轴系稳定性及汽轮机末级长叶片的开发设计技术等。

(3) 在国产化的条件下尚需要解决的一些技术问题。

(4) 对于更大容量的超临界机组, 比如 700 ~ 1300MW 等级的机组, 还需要解决因机组大型化而带来的技术问题。

(5) 在发电机的设计、制造和大件运输等方面会遇到相应的技术问题。

“十五”国家重大技术装备研制和国产化项目“600MW 超临界火电机组研制”项目主要关键技术和攻关内容:

(1) 600MW 超临界机组系统优化及提高运行性能的研究。

(2) 超临界机组材料和铸锻件国产化。

(3) 超临界火电机组自控系统及关键仪表研究。

(4) 600MW 超临界汽轮机研制。

(5) 600MW 超临界锅炉研制。

(6) 超临界火电机组辅机设备研制。

(7) 超超临界火电机组技术开发预可行性研究。

## 第三节 超临界机组锅炉的技术特点

### 一、超临界火电机组的参数、容量及效率

水的临界状态点的参数为 22.115MPa、374.15℃。理论上认为, 在水的状态参数达到临界点时, 水完全汽化会在一瞬间完成, 即在临界点时, 在饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽、水共存的两相区存在, 二者的参数不再有区别。与较低压力下水的特性不同, 在压力很高的情况下, 特别在临界点附近, 水的质量定压热容  $c_p$  值会有较显著的变化。蒸汽动力装置循环理论分析表明, 提高循环蒸汽的初参数和降低循环的终参数都可以提高循环的热效率。除此之外, 采用再热循环和回热循环也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一直是以提高参数为目的的。另外, 在蒸汽参数相同的情况下, 机组容量增加, 其热耗率会有所降低。在机组容量一定的情况下, 蒸汽参数的提高虽然会提高循环热效率, 但由于这时蒸汽压力升高、质量热容减小, 有可能会对汽轮机的高压缸内效率带来不利影响。因此, 在实际中或许会有一个“最小经济容量”的问题, 即在机组容量小于“最小经济容量”的情况下, 采用超临界参数有可能是 not 经济的。

事实表明,提高蒸汽参数并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,在理论上采用超临界参数可提高效率2%~2.5%,采用超超临界参数可提高4%~5%。目前,世界上先进的超临界机组效率已达到47%~49%。

## 二、超临界火电机组的运行灵活性与可靠性

目前先进的大容量超临界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%~90%额定负荷)内变压运行,变负荷速率多为每分钟5%的额定负荷。美国《发电可用率数据系统》1980年的分析报告中公布了71台超临界机组和27台亚临界机组的运行统计数据,表明这两类机组的平均运行可用率、等效可用率和强迫停运率已无差别。据美国EPRI的统计,容量为600~835MW、具有二次中间再热的超临界机组整机可用率已达90%,1300MW二次中间再热的燃煤超临界机组整机可用率为92.3%,有的还要高一些;有1台ABB公司制造的1300MW超临界机组甚至创造过安全运行605天的记录。同时,从国内引进的几台超临界机组的运行情况看,也说明了这一点,即目前投运的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。

## 三、超临界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,这是因为压力提高后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。一般认为超临界机组的造价比亚临界机组大约增加3%~10%。但由于世界各国的具体情况不同,且各个电站的设计和辅机配套方案等也有所不同,因此,造价增加的幅度不同。

由于电厂的运行成本主要取决于燃料成本,因超临界机组的效率较高,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电厂低。许多专家认为,当煤价超过30美元/t,就应当采用超临界机组;而在煤价较低的地区采用亚临界机组仍然较为合适。如果考虑到污染排放收费的情况,或许该煤价还应再低一些。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也值得考虑,比如电站所处的地理位置、电网的负荷率、上网电价以及环保因素等等。

## 四、水冷壁管圈型式

传统的观念认为只有螺旋管圈水冷壁才能满足全炉膛变压运行的要求,但是目前欧洲的火电机组锅炉仍然采用下炉膛螺旋管圈,上炉膛垂直管屏的传统设计,这种水冷壁系统对于光管水冷壁获得足够的冷却能力是十分必要的,其优点是:可以采用较大口径的光管水冷壁管;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中复杂的流量分配;在低负荷下仍能保持平行管系流动的稳定性。

螺旋管圈水冷壁的缺点是显而易见的,结构复杂、流动阻力大和现场安装工作量大。因而日本三菱公司在亚临界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其管内流量与它的吸热相适