

DIANZHAN  
GUOLU ANQUAN  
JISHU

# 电站锅炉

## 安全技术

王发现 曹志红 等编著



# 电站锅炉安全技术

王发现 曹志红 等编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书共分八章,主要讲述了电站锅炉涉及的主要理论和专业基础知识,介绍了典型电站锅炉的结构、典型锅炉结构特点、电站锅炉安全附件及热工仪表和电站锅炉运行等基本知识,并对电站锅炉常见事故作了阐述。

本书可作为电站锅炉技术人员、司炉人员、电站锅炉检修人员和管理人员的培训教材和参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

电站锅炉安全技术/王发现,曹志红等编著. —郑州:黄河水利出版社,2010.8  
ISBN 978-7-80734-879-5

I.①电… II.①王… ②曹… III.①火电厂—锅炉—安全技术 IV.①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 160866 号

---

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail: hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsicbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:22

字数:510 千字

印数:1—4 100

版次:2010 年 8 月第 1 版

印次:2010 年 8 月第 1 次印刷

---

定价:56.00 元

# 前 言

目前，单机容量为 600 MW 的发电机组已成为我国电网的主力发电机组，600 MW 的发电机组所采用的锅炉既有国内按引进技术生产的，也有成套进口的，型号繁多，结构不同，性能各异。为了了解和掌握这些电站锅炉的特性，提高运行、维护和管理水平，我们结合 600 MW 电站锅炉的结构特点，根据目前运行较多的几种典型锅炉结构，有针对性地讲解锅炉各系统的特点和结构，经反复征求电站锅炉使用单位技术和管理人员以及运行人员的意见，编写了这本《电站锅炉安全技术》。

本书共八章，第一章的第一节、第二节（一、二部分）和第八章的第三节由刘新商编写，第一章的第二节（三、四部分）和第三章的第三节、第四节、第六节由乌新平编写，第二章由赵彦杰编写，第三章的第一节、第二节、第四章的第七节和第五章的第六节由李冀编写，第四章的第一节、第二节、第三节和第五章的第五节由曹志红编写，第四章的第五节、第六章和第八章的第一节由南立志编写，第四章的第四节和第五章的第一节、第二节、第三节、第四节由王发现编写，第七章由赵留喜编写，第一章的第二节（六、七部分）和第三章的第五节、第七节由韩晓明编写，第一章的第二节（五部分）、第四章的第六节、第五章的第七节和第八章的第二节由张栓明编写。全书由王发现、曹志红统稿。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中错误之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见，以便做进一步修订。

编 者

2010 年 2 月

# 目 录

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 前 言                |       |
| 第一章 概 述            | (1)   |
| 第一节 电站锅炉设备的发展概况    | (1)   |
| 第二节 电站锅炉的基础理论知识    | (11)  |
| 第二章 电站锅炉的分类        | (53)  |
| 第一节 电站锅炉的分类及主要型式   | (53)  |
| 第二节 自然循环锅炉         | (63)  |
| 第三节 直流锅炉           | (72)  |
| 第四节 控制循环锅炉         | (82)  |
| 第三章 典型锅炉结构         | (88)  |
| 第一节 整体布置           | (88)  |
| 第二节 锅炉的主要技术特点      | (95)  |
| 第三节 汽包及内部设备        | (108) |
| 第四节 燃烧设备           | (114) |
| 第五节 主要受热面          | (126) |
| 第六节 水、汽、补给水系统      | (139) |
| 第七节 凝结水精处理系统       | (146) |
| 第四章 金属材料与监督        | (155) |
| 第一节 金属材料基础知识       | (155) |
| 第二节 金属材料的性能指标      | (176) |
| 第三节 耐热钢            | (182) |
| 第四节 锅炉用钢           | (184) |
| 第五节 常用钢材的特点及其应用范围  | (192) |
| 第六节 主要金属部件的失效及防止措施 | (196) |
| 第七节 锅炉主要部件金属技术监督   | (199) |
| 第五章 电站锅炉运行         | (202) |
| 第一节 概 述            | (202) |
| 第二节 自然循环锅炉运行       | (202) |
| 第三节 控制循环锅炉运行       | (222) |
| 第四节 直流锅炉运行         | (224) |
| 第五节 循环流化床锅炉运行      | (230) |
| 第六节 过热汽温和再热汽温调节    | (236) |
| 第七节 锅炉安全运行管理       | (248) |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| <b>第六章 电站锅炉安全附件与热工仪表 .....</b> | <b>(250)</b> |
| 第一节 电站锅炉安全附件 .....             | (250)        |
| 第二节 电站锅炉热工仪表 .....             | (261)        |
| <b>第七章 水处理 .....</b>           | <b>(278)</b> |
| 第一节 天然水与水质指标 .....             | (278)        |
| 第二节 锅炉补给水的制备 .....             | (291)        |
| 第三节 水垢和沉积物的形成与防止 .....         | (311)        |
| <b>第八章 电站锅炉经常出现的事故 .....</b>   | <b>(314)</b> |
| 第一节 受压元件的破坏形式 .....            | (314)        |
| 第二节 电站锅炉经常发生的事故 .....          | (316)        |
| 第三节 电站锅炉事故案例 .....             | (329)        |
| <b>参考文献 .....</b>              | <b>(344)</b> |

# 第一章 概 述

## 第一节 电站锅炉设备的发展概况

锅炉用于工业生产、作为动力工具的一部分,最早可追溯至 18 世纪瓦特(1763~1819 年)发明蒸汽机时代,它从最原始的生活用的锅与炉进化成一种重要的生产工具,从而形成了一场产业革命。虽然 1872 年英国首创了锅炉,而真正用于发电的锅炉至 1894 年在巴黎建成第一座火力发电厂才问世。到 19 世纪末,世界各国制造的发电锅炉都还停留在较原始的低汽压(蒸汽压力,下同)、低汽温(蒸汽温度,下同)和小容量的基础上(一般不超过 1.4 MPa、300 ℃和 3 t/h)。从热力学定律可知,若追求高的循环效率,则提高蒸汽的初参数(压力和温度)是必由之路。随着冶金技术的发展,即适用于高温、抗疲劳钢种的冶炼成功,从 20 世纪初到 20 世纪末,电站锅炉设备的发展速度是惊人的,尤其是 20 世纪中叶(50~70 年代)已达到高峰。主蒸汽压力由低压 0.9~1.2 MPa 发展至中压 3.4 MPa,高压 8.8 MPa、超高压 15.7~16.2 MPa、亚临界压力 16.2 MPa,最终至超临界压力 23.5 MPa 及以上。主蒸汽温度亦由饱和蒸汽改为过热蒸汽,对中压机组一般采用 450 ℃(个别亦有到 555 ℃或更高)。在超高压以上的机组中,为追求更高的循环效率,采用再热循环机组(一般为一次再热,亦有少量是二次再热的),其蒸汽温度一般与主蒸汽温度相同,但也有略高于主蒸汽温度的。

由于发电过程是燃料的热能转化成机械能,再转换成电能的连续过程,而这一过程中电能是不能储存和透支的,因此电站锅炉要根据外界用电负荷的变化,及时调整燃料供应量,来保证所产生的电能质量。因此,电站锅炉比工业锅炉和生活锅炉要求更严格,不仅要保证能随时适应外界负荷变化引起的蒸发量的增减变化,而且还要保持蒸汽参数(主要指压力和温度)和燃烧稳定,使整个发电过程不间断地维持下去。近几十年来,随着锅炉容量和参数的提高,各种控制和保护措施也日趋完善,当今的电站锅炉不仅在容量(蒸发量)、参数(汽温、汽压)等方面有了突飞猛进的发展,而且在自动化控制和保护方面也逐步完善,发展很快。

为使读者对电站锅炉有更全面、更深入的了解,现从基本概念开始介绍。

锅炉是利用燃料燃烧释放的热能或其他热能加热给水或其他工质,以生产规定参数和品质的蒸汽、热水或其他工质的机械设备。用于发电的锅炉称电站锅炉。在电站锅炉中,通常将化石燃料(煤、石油、天然气等)燃烧释放的热能,通过受热面传给其中的工质——水,把水加热成具有一定压力和温度的蒸汽。

锅炉主要由锅和炉两部分构成。锅由一定的承压受热面组成,承担着使一定数量的水进入这些受热面,并在它们流经受热面的过程中吸取来自烟气的热量,使水转化成具有一定温度、压力参数与品质的蒸汽的任务。炉承担着使所需的燃料与燃烧所需的空气输入炉内,组织燃料燃烧的任务,使燃烧过程进行得尽可能完全,释放出尽可能多的热

量，使燃烧产生的高温烟气流经各个受热面传热给工质，使温度已经下降的烟气最后通过烟囱排向大气。

初期的锅炉只是由一个圆筒形的锅、一个简单的炉排和一组用来支撑锅与炉排的炉墙所构成。燃烧用的燃料是木块和煤炭，以人力方式投到炉排上燃烧。空气靠炉内外的气流密度差所构成的压差进入炉内，流经炉排、燃烧层形成烟气，流经受热面，排出炉外，通风是自然的。锅内的水因受热而产生蒸汽后，以略带水分的饱和蒸汽方式流出锅外，进入汽轮机或其他用户。由于通风的原因，相应于产生 1 t/h 汽所需的炉排面积常在  $1\text{ m}^2$  以上，受热面积常在  $100\text{ m}^2$  以下，蒸汽的工作参数与锅炉的热效率也只能是低下的，无法与日益提高的生产需要相适应。锅炉的变革围绕着以下要求进行：生产的发展要求增大锅炉的蒸发量、发电厂的机组容量，以满足电力的需要；提高锅炉机组的工作参数，通过发电厂热力循环效率的提高，提高发电厂的运行经济性；降低锅炉的金属耗用量与加工量，以降低发电厂的投资与发电成本；提高对锅炉运行的检测功能和自动控制程度，确保运行的可靠性与安全性，并减少运行人员的配置；减少锅炉排放烟气中的有害物质浓度，以确保环境少受污染。

## 一、锅——蒸发受热面的变革

受热面方面的变革是随着锅炉容量和锅炉出口蒸汽参数的提高以及热力发电厂工质循环从朗肯循环改变成回热、再热循环而进行的。锅炉的受热面积必须随着锅炉容量的提高成比例地增多。为了提高蒸汽热力发电厂的循环效率，锅炉的工作参数需要提高。承压的锅炉受热面不再是早期的一个大直径的圆筒，需要由许多小直径的管子构成，于是首先是火筒式的，随后是烟管式的，再晚一些是水管式的，各种受热面布置相继问世。经过生产实践，人们对换热过程的认识不断提高，知道在炉内壁面上布置水冷壁管，不仅能比作为对流受热面的管束具有更大的吸热能力，而且具有保护炉墙、简化炉墙结构的效果，因此作为辐射受热的水冷壁受热面也应运而生。与各种层燃燃烧装置相配合的、带有水冷壁受热面的、烟管式或水管式的、工作压力不高的小型锅炉，迄今还在生产，也广泛地被使用于小型发电厂及工业锅炉领域。

饱和蒸汽的压力与温度之间存在着不变的关系。一定的压力对应一定的饱和蒸汽温度。锅内的水都是处于饱和温度的，提高锅炉工作压力与饱和温度，其结果是烟气与锅水间的温度差下降、受热面吸收烟气热量的能力下降、烟气热量的可利用程度下降。因此，另设置一组受热面，使流经这组受热面的是温度较低的给水，那么受热工质与放热烟气间的温度差就可以提高，烟气热量的可利用程度就不再受到锅水温度的影响。这组受热面也就是常说的省煤器。热力循环要求锅炉出口处的蒸汽是过热蒸汽，锅炉需另增加一组受热面，使出自汽包的饱和蒸汽再接受烟气的加热。这组受热面就是常说的过热器，是发电厂锅炉必有的受热面组件。随着对回热循环的进一步认识，通过尽可能多地抽取汽轮机已膨胀或已部分膨胀做功的蒸汽来加热锅炉的给水，将可获取较高的循环效率。由于抽汽回热的结果是提高了锅炉的给水温度、降低了前述省煤器的作用，锅炉的排烟温度将大幅度增加，锅炉效率将大幅度下降。为使这些热量返回到炉膛之中，人们又发明了空气预热器。它既使烟气的低温热量返回到炉膛中，又使锅炉制粉系统的煤粉

干燥剂有了合适的来源，更使炉内温度水平由于这项热量的投入而提高，促进了炉内着火稳定和煤粉炉低负荷稳定运行极限的降低。空气预热器成为几乎所有煤粉炉的必有受热面部件。

随着对锅炉容量和工作参数要求的不断提高，目前容量稍大的锅炉受热面具有如下的特点：

(1)所有的承压受热面都由直径不大(几十毫米级)的管系所构成。

(2)炉膛内布置了大面积的水冷壁受热面，其相对于炉壁面积的敷设程度随着锅炉容量的增大而增大。

(3)具有一个过热器受热面部件，其与锅炉总受热面积的比值随着锅炉工作参数的提高而增加。

(4)具有一个省煤器受热面部件，其相对受热面积一般随着锅炉蒸汽参数和给水温度的提高而减小。

(5)具有一个大面积的空气预热器，其相对受热面积取决于燃用煤种以及锅炉蒸汽参数。

朗肯循环与回热循环理论证明，热力循环的初蒸汽参数愈高，发电厂循环效率愈高。在锅炉采用小直径管系作为受热面以后，使压力提高并不困难，但对温度的提高，却受到管壁材质耐高温能力的限制。迄今适用于蒸汽温度高于 540℃ 的过热器管子材料都是十分昂贵的。为进一步提高循环效率，人们让过热蒸汽在汽轮机的高压缸内膨胀做功后，再从高压缸出口抽取压力与温度已经有所降低的蒸汽，进入锅炉的一组工作压力较低的受热面中进行加热，使蒸汽重新升温到接近过热蒸汽出口温度，再返回到汽轮机的中低压缸中膨胀做功，这样将使循环效率得到提高。这一组受热面就是常说的再热器，它具有与过热器相同的作用，但工作压力相对较低。近期的大型发电机组多按再热循环设计，锅炉中设置再热器，能使发电厂的热效率和经济性得到提高。

早期的锅炉工作参数不高，受热面的热负荷相对也小。在不高的工作压力下，汽与水间的密度差大，受热面内受热工质流动，完全可以依靠上升管中汽、水混合物与下降管中水之间的密度差来推动，流动使产生于受热面上的气泡能很快脱离表面被带走。这种水在受热面一侧的流动也就是常说的水循环，这种依靠汽、水混合物与水的密度差，自然建立起来的流动或者说水循环，就是常说的自然循环。在工作压力低的锅炉中，由于密度差大的原因，一般是不存在因水循环问题而产生的金属温度问题的。但是随着锅炉工作压力的增加，汽、水间的密度差减小，促使锅炉水循环的推动力减少，加上随着锅炉容量增大，受热面与连接的管长增大，流通阻力增大，使汽、水在锅内的流动变得困难。为维持可靠的水循环，人们在循环回路的上升管段与下降管段之间串接一个增加推动力的辅助循环泵。汽、水循环的推动力，由自然循环与辅助循环泵共同提供。循环泵的流量就是循环回路的流量，使流经受热面的流速或者流量可以得到保证与控制，这就是常说的控制循环，按这种方式运转的锅炉也就是常说的控制循环锅炉。当锅炉工作压力高于临界压力时，汽与水已经不分，失去了密度的差别，也就失去了建立自然循环的可能性。锅内汽、水流动的推动力需要完全依靠泵来提供，从而也就出现了直流锅炉，即给水一次流经受热面，吸收炉内热量转变成过热蒸汽。锅炉的受热面也随之失去了省煤器受热面、蒸发受热面、过

热器受热面间的明确分界，锅炉也不再需要汽包，这是直流锅炉的明显特点。与此同时，也出现了带有汽包，介于直流锅炉与汽包锅炉之间，可按超临界压力、也可按亚临界压力运行，类同控制循环锅炉构成的多次强制循环锅炉。因此，蒸汽参数不高的锅炉多是自然循环锅炉；亚临界压力的锅炉多是自然循环锅炉，但也有控制循环锅炉或直流锅炉；而超临界压力的锅炉基本上是直流锅炉，但亦有多次强制循环锅炉。

## 二、炉——燃烧方式的变革

随着锅炉机组容量的提高，燃烧装置的型式和容量也不断发展。原有属于层状燃烧方式的炉排面积随之增大，既因人工投煤在体力上的无法胜任，也因这种间歇投煤方式，使燃料与空气之间在时间上无法配合，燃烧工况难以稳定，锅炉效率不高。为满足锅炉容量与锅炉效率较高的要求，加煤必须是连续的、机械的，使燃烧装置由原有的固定炉排，逐步向梯形炉排、下饲式加煤、振动炉排、链条炉排、抛煤机链条炉排等多种层状燃烧方式发展。多种层状燃烧方式，在对锅炉容量要求并不太高的发展初期，因加煤的连续性和机械化，在锅炉效率的提高方面起了相当积极的作用，使它迄今在小型的蒸汽热力发电厂中仍在应用，如目前与 3 000 kW 机组配套的 20 t/h 锅炉，大部分是链条炉，与 6 000 kW、12 000 kW 机组配套的 35 t/h、65 t/h 锅炉，仍是抛煤机链条炉。但是，随着对锅炉机组容量的要求进一步提高，炉排面积难以进一步随锅炉容量成正比例地增大，于是煤粉燃烧方式发展起来。煤粉具有巨大的反应表面积，燃烧过程可在近 1 s 或数秒钟的时间内完成，煤粉可凭气力输送，燃烧过程在随同气体流经炉内的过程中完成，燃料在炉内的存量很少，使它的负荷调节特性也适合于发电厂锅炉的要求，因此煤粉燃烧方式迅速广泛地被应用于发电厂的锅炉中，目前 75 t/h 容量以上的锅炉几乎都是采用的煤粉燃烧方式。

在煤粉燃烧锅炉中，燃烧后产生的灰渣有固态排渣和液态排渣两种方式。前者产生于燃烧过程中的灰渣，以固体状态排出炉外，炉内的温度水平受到一定的限制，烟气中的飞灰浓度也高，炉膛的尺寸也相对较大。后者灰渣以液态排出炉外，炉内的温度水平高，熔渣段炉壁上的灰渣呈熔融状态，既有利于燃烧过程的稳定与强化，也有利于对飞灰的粘捕，烟气中的飞灰浓度小，减少了飞灰对受热面的磨蚀。液态排渣这种燃烧方式曾在 20 世纪中叶有迅猛的发展，液态排渣旋风炉就是由此派生的。液态排渣燃烧方式还具有灰渣综合利用方面的特点，经蒸汽吹散后的液态渣能成为有效的绝热材料，矿渣棉就是一例。但是因液态排渣炉的炉内高温促进诸如 NO 等有害气体的生成，提高了烟气中有害气体浓度，有碍环境保护，使它的发展受到挫折。目前的电厂锅炉基本上都是固态排渣的。

锅炉的燃烧装置需要与一定的煤炭特性相配合，锅炉的受热面布置也是与一定的煤炭特性或煤种相适应的。小型发电锅炉机组的蒸汽参数一般都低，对锅炉出口蒸汽参数变化的指标要求也不高，因此受煤种变化的影响相对较小。随着锅炉容量与参数的提高，锅炉都按特定的煤种设计，发电厂也都与合适的煤矿签订供煤合同，使燃用煤种与设计煤种吻合。但是，随着锅炉容量的增大，一台大型锅炉的日耗煤炭可逾万吨，已难由一个矿井或者一个煤矿提供煤炭，使锅炉燃用煤质不易稳定。除在燃煤供应组织和煤场堆

放、储存、输送上下工夫外，在锅炉设计布置上也必须考虑到改变燃用煤种的相应措施。

在层燃式锅炉中，煤炭处理是相对简单的，而煤粉炉则需要燃用粒径在  $100\ \mu\text{m}$  以下的煤粉。在早期小型的煤粉炉中，煤粉可以由集中的煤粉加工厂制备，然后供应锅炉燃用。但是对于大型锅炉，它必须自身具备一个煤粉制备系统。各种不同的磨煤机，诸如圆筒式钢球磨、锤击式磨煤机、中速磨煤机、风扇磨煤机等相继出现，都以它们各自的工作特性来适用于不同的煤种以及各个单机的出力极限。锅炉根据具体情况配备磨煤机和制粉系统。制粉系统可以是储仓式的，也可以是直吹式的。然而，目前与新建发电厂大型锅炉相适应的多半是直吹式的，并且是由以中速磨煤机为主体的、若干个子系统构成的制粉系统。

随着锅炉容量的增大，锅炉外形尺寸的增大，一台大型锅炉的高度已达六七十米甚至近百米，使锅炉各部件间的相对膨胀量增大，大型锅炉的受热面改为悬吊结构，并迫使锅炉炉墙的构成产生巨大的变化，由支承改为吊敷。小型锅炉的炉墙是重型的、砖砌的，炉墙也起汽包与受热面的支承作用。而在大型锅炉中，炉墙基本上都是轻型的，敷置在受热面上，它由受热面支承，随受热面膨胀。

煤粉的燃烧是在煤粉随同气流流经炉膛的过程中进行的。虽然煤粉颗粒尺寸很小，但是在通常的炉膛热负荷下，煤粉允许在炉内的平均停留时间也仅约  $3\ \text{s}$ 。燃烧过程由燃烧器与炉膛共同组织，如何使气流在炉内有一个合适的流动，使整个炉膛空间能得到充分的利用、煤粉在炉内实际停留时间得到延长、燃尽程度得到提高，是十分重要的。入炉的煤粉气流需要首先吸取炉内的热量和升高自身的温度，才能着火燃烧，进而与二次燃烧空气及时混合，才能继续其后的燃烧过程。恰当的混合是既保证着火稳定又保持后续燃烧过程的必要条件。这使诸如涡流燃烧器、切圆燃烧器、U 形火焰直流燃烧器等多种燃烧方法应运而生。发电厂锅炉负荷需随外界用电负荷而变化，锅炉的运行会随负荷的下降、启动、停炉而处于低负荷状态。燃用煤种、受热面、燃烧器及它们的布置将影响到这一低负荷的稳定极限。因此，在煤粉炉中大多配置有油燃烧器，以满足启动点火的需要和低负荷稳定燃烧的要求。

随着锅炉容量的增大以及炉膛容积和尺寸的增大，炉内火焰中心区域高温烟气的热量需要通过更长的途径才能转移到水冷壁面上，使火焰中心区域温度水平提高，又促使  $\text{NO}$  等有害气体形成。为了降低有害气体的浓度，各种低  $\text{NO}$  燃烧器和燃烧器布置方式，诸如低氧燃烧、二段燃烧、烟气再循环等燃烧技术发展起来。一种介于层燃与室燃之间，具有低温燃烧特性，并可通过在燃料中掺加石灰石等脱硫剂进行炉内脱硫的流态化燃烧技术得到发展；一种主要目的在于改善煤炭输送条件，也兼有有害气体发生量少的水煤浆燃烧技术得以发展。但是也应该说明，目前的各式流态化燃烧技术还处于中小型锅炉试验阶段，相距在大型电厂锅炉中广泛实际应用还有一段距离，还有一些问题需要解决。

### 三、电站锅炉的发展趋势

#### (一)容量和参数

##### 1. 锅炉容量

扩大单机容量可使发电能力迅速提高以适应生产发展的需要，同时可使每千瓦的基

建投资下降，设备费用降低，减少运行费用，节约金属材料消耗，减轻环境污染，因此扩大单台机组容量是个总趋势。以美国为例，在 20 世纪 50~70 年代初期，单台电站锅炉的容量迅速由 670 t/h 增加到 4 500 t/h 左右(配 1 300 MW 机组)，B&W 公司在此期间生产了 8 台 1 300 MW 机组的锅炉。从那以后，单机容量已停止增长，甚至有所下降，直到 20 世纪 90 年代初，才又投运了一台 1 300 MW 机组。因为进入 70 年代后，要求燃用劣质煤，对机组的可用率产生不利影响，对大机组的影响更大，而且核电机组担任基本负荷的比例增高，火电机组担负中间负荷的趋势增强，而大容量火电机组调峰能力差，所以美国的主力机组为 500~800 MW 机组。

苏联在 20 世纪 70 年代以前以 200~300 MW 机组为主力机组；从 1976 年开始，500 MW 和 800 MW 机组的比重逐年增加，最大的机组为 1 200 MW，于 1980 年投入试运行，1983 年正式工业运行。他们曾规划在 800 MW 机组完善化后，发展 1 200 MW 和 1 600 MW 机组，但由于社会和电网的原因，第 2 台 1 200 MW 机组迟迟未能建造，发展 1 600 MW 机组的计划也落空了。

日本虽然以 350~600 MW 机组为主力机组，但在发展大容量火电机组方面走在了世界前列。近年来，日本投运了多台 1 000 MW 级机组，锅炉容量为 2 900~3 190 t/h，而且日立公司、三菱重工和石川岛播磨公司等三大锅炉制造商都能生产。他们开发了变压运行机组，使大机组能承担调峰任务。

英国以 500~600 MW 机组为主力机组，并计划向 800~1 000 MW 机组方向发展。

总之，在世界范围内，应用较多的是 300~800 MW 的发电机组。

近十多年，我国新投运的火电机组以 300 MW 和 600 MW 容量为主，最大单机容量达到 800 MW，2 台 900 MW 超临界压力变压运行机组将于近期在上海外高桥电厂投运。到 2000 年底，300 MW 及以上的大容量机组占装机容量的 38%。

2.蒸汽参数

表 1-1 给出了锅炉蒸汽参数与发电机组热耗之间的关系，但压力提高会使设备投资增大。按当前条件，技术经济比较表明，单机容量为 300~600 MW 的机组，以采用亚临界压力为佳；单机容量达 900~1 000 MW 的机组，则采用超临界参数具有一定优越性。超临界压力参数一般采用 24~25 MPa。

表 1-1 锅炉蒸汽参数与发电机组热耗之间的关系

|               |        |       |         |       |         |
|---------------|--------|-------|---------|-------|---------|
| 主蒸汽压力(MPa)    | 16.5   | 24.1  | 25.5    | 31.0  | 31.0    |
| 主蒸汽温度(℃)      | 538    | 538   | 538     | 566   | 566     |
| 再热蒸汽温度(℃)     | 538    | 538   | 552/566 | 566   | 566/566 |
| 热耗(kJ/(kW·h)) | 10 000 | 9 819 | 9 636   | 9 590 | 9 488   |
| 热耗降低百分数(%)    | 0      | -1.8  | -3.6    | -4.1  | -5.1    |

目前，世界各国大容量锅炉采用的蒸汽压力，主要可分为超高压(14~16 MPa)、亚临界压力(17~21 MPa)和超临界压力(23~26 MPa)三个级别。受奥氏体钢价格的限制，蒸汽温度多采用 540 ℃或 568 ℃。

### 3. 高效超临界压力

国际上通常把主蒸汽压力在 28 MPa 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)压力机组, 通常也称为超超临界(ultra supercritical)压力机组或现代超临界(advanced supercritical)压力机组。这样定义的理由是因为这个参数是锅炉、汽轮机只需使用一般超临界压力机组用钢即可, 超过这个参数就必须采用改进或新开发的耐热钢种来制造高温、高压部件。

近十余年, 高效超临界压力技术引起了各国的广泛关注, 并在日本和欧洲得到迅速发展, 投运了一批高效超临界压力机组, 取得了良好的运行业绩。例如, 丹麦 NV 电厂 1998 年投运的一台 400 MW 燃煤机组, 采用二次中间再热, 蒸汽参数为 28.5 MPa、582/580/580 ℃。由于采用了一系列先进技术, 加之利用低温海水作循环水, 纯凝汽运行方式热效率达到 47%, 实施热电联产, 当抽汽量最大时热效率为 90%。仅就凝汽发电的热效率而言, 就比我国现有的亚临界压力机组高出 10% 左右。

在已投运的高效超临界压力机组中, 单机容量除丹麦的 3 台为 400 MW 等级外, 其余都在 700~1 000 MW 之间。

严格地说, 现已建成的高效超临界压力机组尚属过渡型。随着材料技术的发展, 各国计划在 10~20 年内将开发蒸汽参数更高的高效超临界压力机组。

欧洲一些公司正在联合开发蒸汽压力达到 40 MPa、蒸汽温度为 700 ℃ 的高效超临界压力机组, 机组的热效率可能达到 55% 以上。

日本的计划是: 第一步生产 31 MPa、566/566/566 ℃ 的高效超临界压力机组。但采用该参数的 700 MW 机组于 1989 年投运后, 发现其制造成本显著偏高, 缺乏市场竞争力, 所以近年来日本各公司都转为生产 24.5 MPa、600/600 ℃ 等级的高效超临界压力机组, 虽然热效率降低了 0.5%, 但制造成本大大减少。日本的第二步打算是研制 34 MPa、650/595/595 ℃ 的高效超临界压力机组, 期望最终比现有的 24.1 MPa、538/538 ℃ 超临界压力机组的热效率提高 6%~7%。

### 4. 中间再热

为了提高机组的热效率, 大型机组毫无例外地都采用了中间再热循环。不过每增加一次再热, 所获得的经济效益将低于前一次。例如, 采用一次再热可使循环热效率提高 4%~6%, 二次再热只能再提高 1.2%~2%。由于再热蒸汽的压力较低(一般为主蒸汽压力的 1/5 左右), 比体积(比容)很大, 压降有严格限制, 不能超过 0.2~0.3 MPa, 这就给再热器和再热蒸汽管道的布置带来很多不利条件, 且使投资增加。因此, 大多数机组只采用一次再热, 两次再热主要用于超临界压力机组, 以使汽轮机末级叶片的蒸汽湿度控制在允许范围内。

主蒸汽温度保持不变, 仅将再热蒸汽温度提高 10 ℃ 便可使热耗降低 0.20%~0.25%。再热蒸汽的压力很低, 若再热器和过热器采用同样的钢材, 则允许再热蒸汽的温度高一些。因此, 再热蒸汽通常采用与主蒸汽相同或稍高一些的温度。

### (二) 变压运行超临界压力锅炉

近年来, 各国电网的峰谷比日益加大。例如, 美国为 1 : (0.25~0.30), 德国为 1 : (0.20~0.50), 我国为 1 : 0.70 左右。加之电源结构中核电担任基本负荷的趋势增长,

所以要求火电机组参加调峰运行。自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉都可用于中间负荷机组,但直流锅炉的调峰性能要更好一些。

对于直流锅炉的水冷壁,欧洲沿袭了下炉膛用螺旋管圈、上炉膛用垂直管屏的传统设计。但单机容量超过 1 000 MW 后,管带过宽、热偏差增大,而且水冷壁吊挂结构复杂化,所以 1 000 MW 被认为是螺旋管圈水冷壁单炉膛锅炉容量的上限。

日本三菱公司在亚临界控制循环锅炉设计制造经验的基础上,开发出了一次上升垂直管屏水冷壁变压运行超临界参数锅炉,其特点是:①采用内螺纹管,以防止变压运行至亚临界区域时,水冷壁内发生膜态沸腾;②在水冷壁管入口处设置节流圈,使其管内工质流量与吸热量相适应;③在烟道内布置蒸发器。

### (三)燃烧技术

#### 1.低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术

$\text{NO}_x$  是唯一可通过改进燃烧技术使排放量减少的污染物,各种低  $\text{NO}_x$  燃烧技术可使  $\text{NO}_x$  的排放量减少 20%~45%。

#### 2.超细化煤粉燃烧技术

所谓超细化煤粉,是指粒径为 1~20  $\mu\text{m}$  的煤粉,比常规煤粉粒径小 10 多倍。这是一种新兴的煤粉燃烧技术。超细化煤粉由于比表面积大,因此易于着火,燃烧速度快,易于燃尽,可以明显地改善难燃煤种的燃烧特性。由于燃烧速度快,灰粒冷却加快,可以有效地减少飞灰在炉内受热面上的沉积,增强水冷壁附近的烟气的氧化性气氛,减少结渣。此外,超细化煤粉反应活性的增加,使其在燃烧初期更易形成还原性气氛,延长了烟气在还原区内的停留时间;超细化煤粉煤焦比表面积的增加,增强了还原  $\text{NO}_x$  的能力。因此,燃用超细化煤粉可降低  $\text{NO}_x$  排放量。

超细化煤粉会增加煤粉制备的成本。但日本在一台 700 MW 机组上进行超细化煤粉燃烧的工业试验结果表明,综合考虑电厂各经济指标,使用超细化煤粉可使运行费用降低 1.7 美元/kW。

#### 3.流化床燃烧技术

流化床燃烧技术是一种公认的有发展前途的清洁燃烧技术,其脱硫率可达 90%以上,当采用二级分段燃烧时,  $\text{NO}_x$  的排放也能满足严格的环保要求,除循环流化床外,增压流化床近年也有较快的发展。

### (四)受热面结构

#### 1.膜式结构

除膜式水冷壁外,锅炉其他承压的受热面,如屏式过热器、再热器、对流过热器和省煤器,都进行过一系列膜片化试验研究和工业性试验,效果良好。特别是膜式省煤器在各国已得到广泛应用。这些受热面采用膜式结构后可以减少金属耗量,减少管组所占空间,还有利于减少受热面污染和飞灰磨损,提高运行经济性。

#### 2.热管空气预热器

与回转式空气预热器相比,热管空气预热器无转动部件,无空气泄漏,可不停炉进行维修,管壁温度较高不易引起烟气侧低温腐蚀,因而受到青睐。

## (五)金属材料

大容量电站锅炉的承压部件主要用奥氏体钢和铁素体钢制造。奥氏体钢热强性高，但导热性差，膨胀系数大，抗应力腐蚀能力低，工艺性能差，而且成本高，所以要尽量少用奥氏体钢，多用新开发的铁素体钢和改进的奥氏体钢。

### 1.水冷壁的材料

由于制造、特别是安装的要求，锅炉水冷壁必须用无需焊后热处理的材料制成。高效超临界压力锅炉的水冷壁管壁温度按 500℃ 设计，可以认为是安全的，可采用 13CrMo44、12Cr1MoV 或 10CrMoV910 等铁素体材料制造。13CrMo44 在 582℃ 下也不会发生高温腐蚀。

低合金铬钼钢的最大不足是其高温蠕变断裂强度低。日本新研制的 HCM2S 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 2.25Cr1Mo 的可焊性，已列为 SA213-T23，可代替 13CrMo44 用于更高的蒸汽参数。

### 2.过热器、再热器出口联箱及其连接管道的材料

高效超临界压力锅炉当前所用的 P22(X20CrMoV121)，极限许用温度略高于 550℃，若采用改善的马氏体钢 P91(X10CrMoVNb91)做联箱，极限许用温度可超过 580℃。用 P91 代替 P22，尽管焊接性能差一些，但壁厚可减薄 50%以上。对于联箱，采用新一代 9%~12%Cr 系钢，如 E911、NF616 和 HCM12A 等，其壁厚可比 P91 再减薄 40%。

### 3.过热器、再热器管束用钢

在 600/600℃ 的汽温条件下，过热器、再热器的最高管壁温度达到 650~670℃，必须选用奥氏体钢，如 TP347H、TP347HFG、Super304H 等。高温段部分还要采用 20~25Cr 系奥氏体钢，如 HR3C、NF709、TempaloyA-3 等。这种材料有足够高的蠕变断裂强度，而且因含铬量高还能抗高温腐蚀。奥氏体钢虽在热疲劳时易出问题，但用于管束，由于直径小、管壁薄，产生热疲劳的可能性不大。日本近期开发出的 Tempaloy AA-1 奥氏体钢，可用于 30 MPa 以上、630℃ 的蒸汽参数。

## (六)可靠性技术

(1)建立发电设备可靠性分支学科。它包括发电设备可靠性理论基础、可靠性工程技术、可靠性管理等内容。

(2)可靠性设计技术。例如锅炉承压部件的可靠性设计技术，它以现有的强度计算公式为基础，考虑设计量离散性的影响，建立锅炉承压部件可靠性设计计算模型，在设计阶段定量确定锅炉承压部件设计的可靠性指标。

(3)可靠性制造技术。如改进制造工艺来提高产品制造的可靠性水平，又如实施可靠性筛选检验。对进厂管子进行 100%材质筛选检验，剔除材质不符合要求的管材，对制造焊口进行 100%探伤检验，多次用压缩空气通球试验来淘汰被异物堵塞的管子等。

(4)提高安装、检修质量。如对焊口全部进行探伤检验；保证管排间距，避免形成烟气走廊等。又如变定期检修为设备状态检修。

(5)运行中对锅炉承压部件进行在线检测，及时发现泄漏现象，避免事故扩大。

(6)对承压元件的剩余寿命进行预测。

## (七)洁净煤发电技术

洁净煤发电技术是指在发电设备中实现煤的清洁燃烧与高效利用的技术。由于洁净煤发电技术对节约能源、提高能量利用质量、保护环境有重大作用,因此受到各国的高度重视,是一门迅速发展中的技术。概括而言,可划分为以下几个主要技术领域。

### 1.煤炭利用前的净化技术

(1)选煤。常规的选煤方法可以除去 50%~80%的灰分和 30%~40%的硫分。据统计,每人选 1 亿 t 原煤可以减少燃煤  $\text{SO}_2$  排放量 150 万 t,而选煤脱硫成本仅为烟气脱硫费用的一半。因此,选煤是提高商品煤总体质量的关键,是洁净煤发电的源头技术,对于提高煤炭行业的整体效益,减轻铁路运力也具有重要意义。

(2)水煤浆。水煤浆在制备过程中进行了煤的浮选净化处理,可除去原料煤中灰分的 50%~75%、黄铁矿的 40%~90%,并可回收原煤热值的 90%~98%。水煤浆是一种煤基流体,它能像石油一样便于管道运输、燃烧和贮存。水煤浆不但是一种代油燃料,用于代煤也有节能和环保的双重效益。

(3)微生物脱硫。微生物脱硫就是把煤粉悬浮在含细菌的液体中,在细菌的催化作用下使硫氧化为硫酸根,从而达到细菌脱硫的目的。微生物脱硫离工业应用还相差甚远,目前尚处于研究阶段,但它是一种有着广阔应用前景的脱硫方法。据研究,它能去除 80%~90%的黄铁矿和 10%~30%的有机硫,硫的总脱除率为 50%~70%,与炉内喷钙脱硫法的效率(30%~70%)相当,但投资成本仅为后者的 5%~7%,运行费用仅为后者的 12%~20%。

### 2.煤的清洁燃烧技术

煤的清洁燃烧技术包括两个主要领域:一是改进传统的煤粉高温燃烧方式,采用先进的低  $\text{NO}_x$  燃烧技术;二是开发新一代高效低污染煤燃烧技术,主要有循环流化床燃烧技术,各种先进的燃煤联合循环技术(整体煤气化燃气-蒸汽联合循环,增压流化床燃气-蒸汽联合循环、燃煤磁流体联合循环发电等),燃料电池技术等。它们不仅使燃煤发电效率有较大提高,大幅度减少  $\text{NO}_x$  的排放,有的技术还具有易于脱除  $\text{SO}_2$  的技术优势。燃煤联合循环发电技术还有燃料适应性强、调峰性能好的优点。

美国 21 世纪能源工厂的预计指标为:燃煤发电效率 60%,燃用天然气为 75%,热电联产效率 85%~90%;粉尘和  $\text{SO}_2$  接近零排放; $\text{CO}_2$  排放减少 50%,并 100%得到分离;可生产一系列的产品,如合成气、煤化工产品和电力等。

### 3.烟气净化技术

(1)燃烧中的脱硫技术。主要有流化床燃烧和炉内喷石灰石加尾部增湿活化等方法。

(2)燃烧后脱硫技术。主要有石灰石-石膏湿法脱硫、旋转喷雾半干法脱硫、电子束脱硫、海水脱硫等方法。

(3)脱硫、脱硝一体化技术。如用活性炭处理锅炉排烟,可同时脱硫、脱硝、除尘,并有较高的脱除率;节约用水,几乎不需要生产工艺用水;无二次污染,副产品有较高的商品价值;装置简单,占地小,投资少,运行费用也较低。该技术已用于日本一台 350 MW 流化床机组的脱硝和一台 600 MW 燃煤机组的脱硫。但从总体上看,脱硫、脱硝一体化技术的方案并不多,是目前的重要研究课题,也是未来烟气净化的发展方向。

需要指出的是,高效的烟气脱硫、脱硝技术会显著增加电厂的基建和运行费用。例如,丹麦 NV 电厂 3 号机组(400 MW 高效超临界压力机组),总投资为 40 亿丹麦克朗,投资项目比例为脱硫脱氮 16%,锅炉 25%,土建 20%,汽轮发电机组 7%,辅机 6%,电气 7%,工程费(监理、建设、调试、设计)11%,备品备件 2%,燃料 6%。其中,热工控制费用含在相应的主机之中。

在实施烟气脱硫的同时,要考虑脱硫产物的有效回收与处理,防止二次污染。

#### 4.煤的转化

煤炭的转化利用方式主要是煤的汽化和液化。相对而言,煤的液化产物的优点更为突出,应用范围也会更广泛,但汽化技术目前要比液化技术成熟得多,费用也低一些。

煤的汽化是指由煤经干馏或汽化等途径而得到气体产物的工业过程。在煤汽化的过程中,可以有效和方便地除掉大部分有害物质(粉尘、硫化物等),还能比较容易地实现煤中硫的有效回收,使在煤气的进一步利用中能大幅度地减少污染物的排放。

## 第二节 电站锅炉的基础理论知识

### 一、工程热力学基本知识

工程热力学的研究对象主要是热能转化为机械能的规律和方法以及提高转化效率的途径。

#### (一)基本概念与基本定律

##### 1.热力学第一定律

自然界中一切物质都具有能量,能量不可能被创造,也不可能被消灭,但能量可以从一种形态转变为另一种形态。在能量的转化过程中,一定量的某种形态的能量总是确定地相应于一定量的另一种形态的能量,能量的总量保持不变。

在工程热力学的范围内,热力学第一定律主要用来说明热能和机械能之间的相互转化和守恒。用简单的数学式表示,即

$$Q=A_J W \quad (1-1)$$

式中  $Q$ ——消耗的热能;

$W$ ——完成的功;

$A_J$ ——与一个单位的功相当的热量,叫做热功当量。

$A_J$ 的数值与能量转化时的条件无关,仅仅决定于热和功所用的单位。

在国际制(SI)中,热能与功采用相同的单位,即焦耳。所以, $A_J=1$ ,这时式(1-1)可写成

$$Q=W \quad (1-2)$$

在工程制中,热能的单位是千卡(kcal),功的单位是千克力·米(kgf·m),这时

$$A_J = \frac{1}{426.9} \approx \frac{1}{427} \text{ kcal/(kgf} \cdot \text{m)} \quad (1-3)$$

把热力学第一定律的原则应用于系统中的能量变化时可写成如下形式