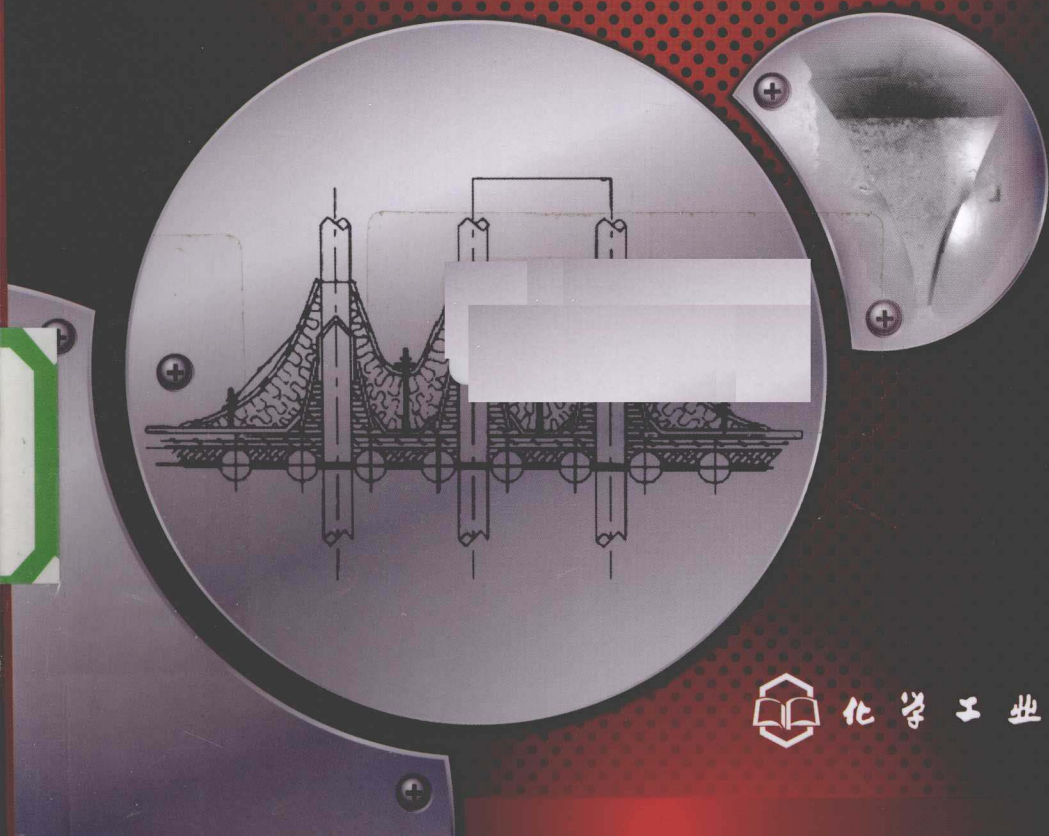


● 张磊 单志栩 李静立 编

GUOLUFANGMOFANGBAO
JISHUYUYINGYONG

锅炉防磨防爆 技术与应用



化学工业出版社

锅炉防磨防爆技术与应用

张磊 单志栩 李静立 编
金生祥 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面、系统地阐述了锅炉防磨防爆的最新技术及方法,内容主要包括:锅炉基本原理与类型、锅炉防磨防爆检查、锅炉防磨防爆组织管理、锅炉防磨防爆检修、锅炉受热面外部防磨防爆机理、锅炉受热面吹灰、锅炉安装及检修后的试验、锅炉事故分析、锅炉防磨防爆最新实用技术。

本书可用作发电供热锅炉专业技术管理人员生产培训及技能鉴定培训用书,也可作为高等学校热能与动力工程专业以及相关专业的教材,亦可作为读者自学用书。

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第021475号

张磊 单志栩 李静立 编
审主 书主主

图书在版编目(CIP)数据

锅炉防磨防爆技术与应用/张磊,单志栩,李静立编.

北京:化学工业出版社,2011.4

ISBN 978-7-122-10532-5

I. 锅… II. ①张…②单…③单… III. 锅炉-安全技术 IV. TK223.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第021475号

责任编辑:郑宇印

责任校对:周梦华

装帧设计:史利平

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 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数298千字 2011年5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:48.00元

版权所有 违者必究

前 言

发电供热企业机组安全稳定运行是设备自身安全的需要,更是发电供热企业完成年度生产经营目标、指标,实现本企业本质安全的需要。故障停机次数低或是没有,发电供热企业的生产经营工作才会呈现良好的势头。无疑,降低故障停机次数、提高机组可靠性是发电供热企业需下大力气抓的重点工作。据火电机组可靠性统计,由于锅炉“四管”爆漏事故造成的非计划停运占60%左右,因此锅炉防磨防爆是保证机组安全、稳定、经济运行的重要基础工作。锅炉防磨防爆管理是各发电公司电力生产管理体系的一项重要工作,应纳入整个发电企业的生产经营管理工作中,本着“预防为主、综合治理”的原则,促进发电企业锅炉防磨防爆管理的规范化、标准化和科学化,提高发电企业锅炉设备的运行水平。锅炉防磨防爆工作是整体工作、系统工程,锅炉防磨防爆检查是锅炉防磨防爆整体工作的一部分。发电企业的锅炉防磨防爆工作必须立足从基建期抓起,坚持从日常监督管理抓起,实行全厂、全员、全专业、全参与,充分发挥和调动防磨防爆小组每名成员的主观能动性,采取可靠措施夯实锅炉本体设备基础,全面系统防治“锅炉四管”泄漏。

为进一步规范各发电供热企业锅炉防磨防爆技术管理,有利于各发电供热企业相互借鉴、举一反三,采取措施降低故障停机次数,编者对锅炉防磨防爆的最新技术进行了梳理、修编,对有借鉴意义的故障停机报告分门别类、编辑成册,供学习掌握。

本书由山东省电力学校张磊、北京京能国际能源股份有限公司单志栩和李静立编写,山东省电力学校陈媛参编。全书由京能国际能源股份有限公司副总裁金生祥主审。

由于时间仓促,作者水平所限,不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年12月

目 录

第一章 锅炉的基本原理与类型	1
第一节 电站锅炉的基本特征	1
第二节 电站锅炉的技术状况和发展概况	6
第二章 锅炉防磨防爆检查	16
第一节 锅炉防磨防爆工作的主要内容	16
第二节 防磨防爆检查项目、周期、验收等级	18
第三节 防磨防爆检查内容与标准	25
第三章 锅炉防磨防爆组织管理	57
第一节 防磨防爆组织机构人员构成及职责	57
第二节 防磨防爆检查实施方法	60
第三节 防磨防爆工作管理流程图	64
第四节 某电厂锅炉防磨防爆检查滚动计划（第三个3年计划）	64
第四章 锅炉防磨防爆检修	69
第一节 防磨防爆检修标准	69
第二节 防磨防爆重点部位	72
第五章 锅炉受热面外部防磨防爆机理	75
第一节 锅炉炉膛结渣	75
第二节 水冷壁的高温腐蚀	80
第三节 对流受热面的高温积灰和高温腐蚀	82
第四节 低温受热面的积灰、磨损和腐蚀	86
第六章 锅炉受热面吹灰	95
第一节 吹灰器布置及系统	95
第二节 吹灰器结构与工作原理	97
第七章 锅炉安装及检修后的有关试验	106
第一节 锅炉试验	106
第二节 化学清洗	111
第三节 停炉后的保养	118
第四节 敷衬耐火材料	120
第五节 锅炉试运行	124
第八章 锅炉爆管事故案例分析	126
第一节 由于四管泄漏引起机组停运	126
第二节 锅炉灭火	168

第三节 其它.....	201
第九章 锅炉防磨防爆技术应用.....	212
第一节 超音速电弧喷涂技术.....	212
第二节 锅炉尾部受热面防磨刷涂.....	220
第三节 NET 炉顶柔性复合密封技术	222
参考文献.....	230

第一章 锅炉的基本原理与类型

电力工业是国民经济发展的基础工业，电力工业的发展水平和电能供应的数量和质量是衡量工业、农业、国防和科技现代化水平的重要标准。发电能源的种类很多，如火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电、地热能发电、潮汐能发电等。当前，世界上主要有三类发电形式：火力发电、水力发电和核能发电。而从总体上讲，火力发电仍然是世界电能生产的主要形式，我国由于能源构成的特点更是如此，其中火电发电约占发电量的 80%。

锅炉在国民经济中具有重要的地位，它是火力发电厂的三大主机之一，同时也是机械、冶金、化工、纺织、造纸、食品等工业生产工艺的供汽、供热设备。

现代机械制造、化工、纺织、造纸、冶金工业规模比较大，都建有自备电站，企业自备电站（热电联产）规模也很大，锅炉容量、蒸汽参数与电站锅炉相差不大。而为民用建筑的采暖提供热源的工业锅炉容量相对较小、蒸汽参数较低，锅炉结构与电站锅炉相差很大。

第一节 电站锅炉的基本特征

锅炉是生产蒸汽和热水的高温高压换热设备，由汽锅和炉子两部分组成，主要由燃料制备系统（制粉系统）、烟风系统、汽水系统和控制系统等组成。

一、火力发电厂的生产过程

目前，世界上的发电厂主要有火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。此外，还有少量的风能、太阳能和潮汐发电厂。火力发电厂是利用煤、石油或天然气等燃料发电的发电厂，燃煤电厂是我国目前的主力型发电厂。

火力发电厂的生产过程如图 1-1 所示。燃料在锅炉中燃烧放出热量，加热给水形成饱和蒸汽，经进一步加热后成为具有一定温度和压力的过热蒸汽，过热蒸汽经蒸汽管道进入汽轮机膨胀做功，带动发电机转子旋转发电。在汽轮机中做完功的蒸汽排入凝汽器，在凝汽器中，蒸汽被冷却水冷却成凝结水，凝结水经凝结水泵升压后进入低压加热器，利用汽轮机抽汽加热后进入除氧器除氧，除氧后的凝结水连同补水由给水泵打入高压加热器，给水在高压加热器中利用汽轮机抽汽进一步提高温度后重新回到锅炉中利用。火力发电厂的生产过程就是不断重复上述循环的过程。

由此可以看出，在火力发电厂的生产过程中存在着三种形式的能量转换：在锅炉中燃料的化学能转变为蒸汽的热能；在汽轮机中蒸汽的热能转变为转子的机械

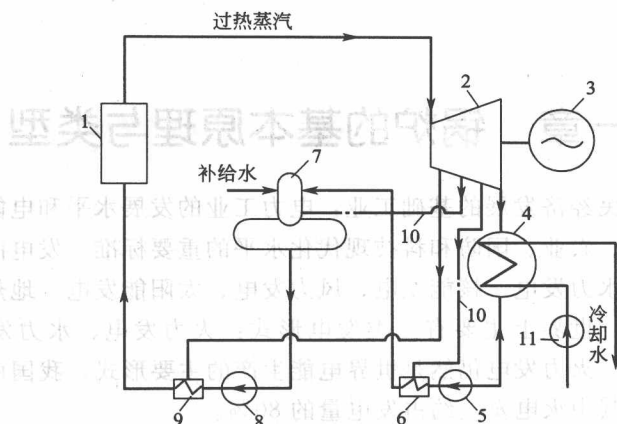


图 1-1 火力发电厂生产过程示意

- 1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—低压加热器；
7—除氧器；8—给水泵；9—高压加热器；10—汽轮机抽汽管道；11—循环水泵

能；在发电机中转子的机械能转变为电能。因此锅炉、汽轮机和发电机被称为火力发电厂的三大主机。

二、电站锅炉的作用和组成

锅炉是将煤、油、天然气等燃料或其它热能释放出来的热量通过金属受热面传递给经净化的水，并将其加热到一定压力和温度的水和蒸汽的连续运行的换热设备。锅炉是火力发电厂三大主机中最基本的能量转换设备。电站锅炉由锅炉本体设备、辅助设备和锅炉附件组成，如图 1-2 所示。

锅炉本体设备是锅炉的主要组成部分，由汽水系统和燃烧系统两大部分组成。锅炉汽水系统由省煤器、汽包、下降管、联箱、水冷壁、过热器、再热器等组成，其主要任务是有效吸收燃料放出的热量，使锅水蒸发并形成具有一定温度和压力的过热蒸汽。

锅炉燃烧系统由炉膛、烟道、燃烧器、空气预热器等组成，其主要作用是使燃料在炉内良好燃烧，放出热量。锅炉的辅助设备主要包括通风设备、制粉设备、给水设备、除尘除灰设备等。通风设备主要包括送风机、引风机、烟风道、烟囱等，其主要作用是提供燃料燃烧和煤粉干燥所需的空气，并将燃烧生成的烟气排出炉外。制粉设备主要包括原煤仓、给煤机、磨煤机、粗粉分离器、细粉分离器、排粉风机等，其主要作用是将原煤干燥并磨制成合格的煤粉。给水设备由给水泵和给水管路组成，其主要作用是可靠地向炉内供水。除尘、除灰设备的主要任务是清除烟气中的飞灰和燃料燃烧后的灰渣。

锅炉附件主要包括安全阀、水位计、吹灰器、热工仪表和控制设备等。此外，锅炉本体还有炉墙和构架。炉墙用来构成封闭的炉膛和烟道；构架是用来支承和悬吊汽包、锅炉受热面、炉墙等。

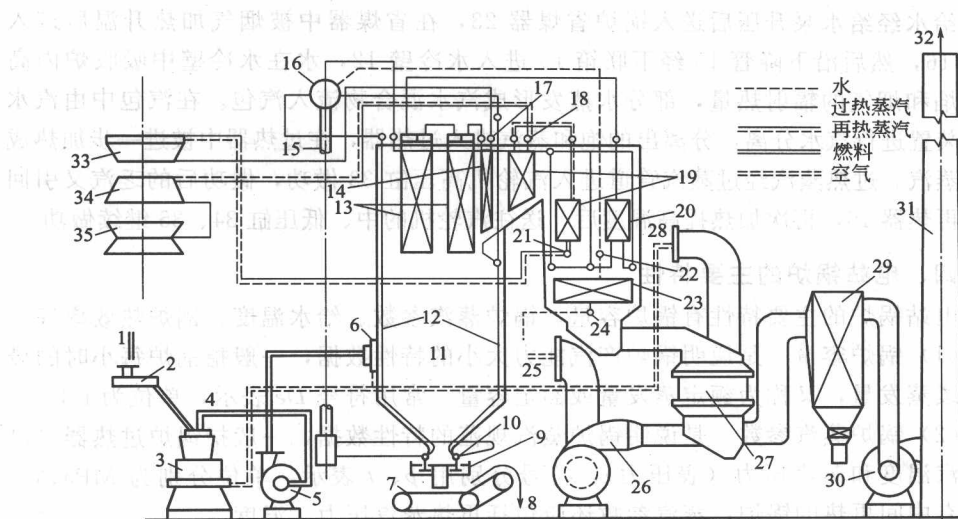


图 1-2 电站锅炉设备构成及生产过程示意

- 1—原煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—风粉混合物出口；5—排粉风机；6—燃烧器；
 7—排渣装置；8—排渣；9—水封装置；10—下联箱；11—炉膛；12—水冷壁；
 13—屏式过热器；14—高温过热器；15—下降管；16—汽包；17—过热器出口
 口联箱；18—再热器出口联箱；19—再热器；20—低温再热器；21—再
 热器出口联箱；22—省煤器出口联箱；23—省煤器；24—省煤器进
 口联箱；25—冷风入口；26—送风机；27—空气预热器；28—热
 风出口；29—除尘器；30—引风机；31—烟囱；32—排烟出口；
 33—汽轮机高压缸；34—汽轮机中压缸；35—汽轮机低压缸

三、电站锅炉的工作过程

下面以图 1-2 所示的具有中间再热、配直吹式制粉系统的煤粉炉为例说明锅炉的工作过程。煤由原煤仓经给煤机 2 进入磨煤机 3，煤在磨煤机中被由空气预热器 27 来的热风干燥，并磨制成煤粉，由排粉风机 5 送至燃烧器。煤粉和空气的混合物在炉内燃烧放热，燃烧生成的高温火焰和烟气在炉膛和烟道中流动时，依次将热量传递给水冷壁、屏式过热器、高温过热器、再热器、低温过热器、省煤器和空气预热器。然后由除尘器 29 除掉烟气中的飞灰，最后由引风机 30 将烟气送至烟囱 31 排往大气。

燃料燃烧需要的空气由冷风入口 25 经送风机 26 升压后送入空气预热器 27，被烟气加热成热空气，然后由热风出口 28 沿热风道将其一部分连同由送风机出口来的冷风送入磨煤机，用于干燥和输送煤粉。另一部分直接送入炉膛 11 作为二次风参与助燃。燃料燃烧后生成的灰，少部分较粗的由炉膛下部的排渣装置 7 排出，大部分较细的飞灰由烟道尾部的除尘器收集，连同排渣装置排出的灰渣由灰水沟经灰渣泵送往灰场。

给水经给水泵升压后送入锅炉省煤器 23, 在省煤器中被烟气加热升温后进入汽包 16, 然后沿下降管 15 经下联箱 10 进入水冷壁 12, 水在水冷壁中吸收炉内高温火焰和烟气的辐射热量, 部分水蒸发形成汽水混合物流入汽包。在汽包中由汽水分离装置进行汽水分离, 分离出的饱和蒸汽进入过热器, 在过热器中被进一步加热成过热蒸汽。过热蒸汽经过蒸汽管道进入汽轮机高压缸 33 做功, 做功后的乏汽又引回锅炉再热器 19, 再次加热提高温度后, 送往汽轮机的中、低压缸 34、35 继续做功。

四、电站锅炉的主要特性

电站锅炉的主要特性有锅炉容量、锅炉蒸汽参数、给水温度、锅炉热效率等。

(1) 锅炉容量 是说明锅炉产汽能力大小的特性数据, 一般指锅炉每小时的最大连续蒸发量, 又称为额定蒸发量或额定容量。常用符号 De 表示, 单位为 t/h 。

(2) 锅炉蒸汽参数 是说明锅炉蒸汽规范的特性数据, 一般指锅炉过热器出口的蒸汽温度和蒸汽压力 (表压力), 符号分别用 p 、 t 表示, 单位分别为 MPa 、 $^{\circ}C$ 。对具有中间再热的锅炉, 蒸汽参数还应包括再热蒸汽压力、温度。

(3) 给水温度 锅炉给水温度是说明锅炉给水规范的特性数据, 一般指省煤器入口处的给水温度。

(4) 锅炉热效率 锅炉热效率是说明锅炉运行经济性的特性数据。它是指锅炉有效利用热量占输入热量的百分比, 常用符号 η 表示, 即

$$\eta = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{输入热量}} \times 100\% \quad (1-1)$$

五、电站锅炉的分类

(1) 按锅炉容量分类 按照容量的大小, 锅炉有小型、中型和大型之分, 但它们之间没有固定的分界。随着锅炉工业的发展, 锅炉的容量日益增大, 以往的大型锅炉目前只能算中型甚至是小型锅炉。根据我国目前锅炉的发展情况, 对于电站锅炉一般认为, 锅炉容量 $De < 400t/h$ 为小型锅炉; $De = 400 \sim 670t/h$ 为中型锅炉; $De > 670t/h$ 为大型锅炉。

我国部分电站锅炉和工业锅炉的蒸汽参数系列见表 1-1。

表 1-1 我国部分电站锅炉和工业锅炉的蒸汽参数

压力类型	蒸汽压力 /MPa	蒸汽温度 / $^{\circ}C$	给水温度 / $^{\circ}C$	容量 /(t/h)	配套机组 /MW	汽水流动方式
低压	2.45	400	104	20~65	1.5~3	自然循环
中压	3.82	450	150	35~130	3~12	自然循环
高压	9.8	540	215	220/410	50/100	自然循环
超高压	13.7	540/540	240	400/670	125/200	自然循环
亚临界压力	16.7	540/540	260	1000	300/600	自然循环/控制循环
超临界压力	25	545/545	275	1000~2650	300~800	直流
超超临界压力	27	600/600	298	1970~3100	660~1030	直流

(2) 按蒸汽压力分类 按锅炉的蒸汽压力高低可分为低压锅炉 ($p \leq 2.45\text{MPa}$, 表压, 下同)、中压锅炉 ($p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$)、高压锅炉 ($p = 7.84 \sim 10.8\text{MPa}$)、超高压锅炉 ($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$)、亚临界锅炉 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$) 和超临界锅炉 ($p \geq 22.1\text{MPa}$, 目前将压力大于 30MPa 的锅炉又称为超超临界锅炉)。

(3) 按锅炉的燃烧方式分类 锅炉的燃烧方式可分为层状燃烧、悬浮燃烧、旋风燃烧、循环流化床燃烧等。600MW 火力发电厂机组的锅炉的燃烧方式为悬浮燃烧, 以燃烧煤粉为主, 称为室燃炉。

层燃炉具有炉排, 煤块或其它固体燃料主要在炉排上的燃料层内燃烧。燃烧所需空气由炉排下的风箱送入, 穿过燃料层进行燃烧反应。此类锅炉多为小容量、低参数的工业锅炉。

室燃炉是目前电站锅炉的主要型式, 燃油炉、燃气炉以及煤粉炉均属于室燃炉。在燃烧煤粉的室燃炉中, 燃料是悬浮在炉膛空间内进行燃烧的, 根据排渣方式的不同, 又可分为固态排渣炉和液态排渣炉。在我国电站锅炉中, 以固态排渣炉为主。

旋风炉是一个圆柱形旋风筒作为燃烧室的炉子, 气流在筒内高速旋转, 较细的煤粉在旋风筒内悬浮燃烧, 而较粗的煤粒则贴在筒壁上燃烧。筒内的高速旋转气流使燃烧加速, 并使灰渣熔化形成液态排渣。旋风筒有立式和卧式两种布置形式, 可燃用粗的煤粉或煤屑。

流化床炉又称沸腾炉, 炉子的底部为一多孔的布风板, 空气以高速穿经孔眼, 均匀进入布风板上的床料层中。床层中的物料为炽热的固体颗粒和少量煤粒, 当高速空气穿过时床料上下翻滚, 形成“沸腾”状态。在沸腾过程中煤粒与空气有良好的接触和混合, 着火燃烧速度快、效率高, 床内安置有以水和蒸汽为冷却介质的埋管, 使床层温度控制在 $800 \sim 900^\circ\text{C}$ 。现代的流化床炉为了提高燃烧效率, 减轻环境污染和对流受热面的磨损, 在炉膛出口处将烟气中的大部分固体颗粒从气流中分离并收集起来, 送回炉膛继续燃烧, 称为循环流化床锅炉。

(4) 按工质在蒸发受热面中的流动方式分类 按工质在锅炉中的流动方式可分为自然循环锅炉和强迫流动锅炉两大类。自然循环锅炉中工质在蒸发受热面内的流动是依靠水冷壁和下降管中工质的密度差形成的循环压头进行的。其工质在蒸发受热面中的流动如图 1-3(a) 所示。蒸发设备由不受热的下降管、受热的蒸发管、水冷壁下集箱和汽包组成, 它们连接成一个闭合的蒸发系统。给水经给水泵流入省煤器, 受热后进入蒸发系统。水在蒸发管中受热时, 部分水变成蒸汽, 故蒸发管内工质为汽水混合物, 而不受热的下降管内的工质为单相的水。由于水的密度大于汽水混合物的密度, 所以下集箱的两侧有不平衡的压力差, 借以推动工质在蒸发系统中循环流动, 水在下降管中向下流动, 汽水混合物在蒸发管中向上流动进入汽包。水和蒸汽在汽包内被分离, 蒸汽由汽包上部引出, 经过过热器过热, 而分离出来的水与进入汽包的给水混合, 流入下降管重新循环。这种循环流动是由于下降管与蒸

发管内工质的密度差而形成的，称为自然循环。亚临界压力以下的锅炉主要采用自然循环的方式。

强制循环锅炉又分为控制循环锅炉、直流锅炉和复合循环锅炉。

控制循环锅炉中工质在蒸发受热面内的流动主要依靠下降管中的炉水循环泵提供的压头进行，其工质在蒸发受热面中的流动如图 1-3(b) 所示。从结构上看，控制循环锅炉和自然循环锅炉有许多相似之处，主要区别在于它在下降汇总管上设置了循环泵，以增强工质循环流动的推动力。自然循环锅炉与控制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将锅炉的省煤器、蒸发设备、过热器分开，并使蒸发设备形成封闭的循环回路，蒸发受热面与过热器有固定的分界点。

汽包锅炉只适用于临界压力以下的工作压力。

直流锅炉中工质在受热面中的流动是依靠给水泵提供的压头进行的，且一次完成加热、蒸发和过热。其工质在蒸发受热面中的流动如图 1-3(c) 所示。直流锅炉没有汽包，工质一次流过蒸发受热面，全部转变成蒸汽。另外，直流锅炉的省煤器、蒸发受热面和过热器之间没有固定的分界点，工质在蒸发受热面内流动的阻力是由给水泵提供的压头来克服的。直流锅炉既可设计为超临界压力，也可设计为临界压力以下。

复合循环锅炉是由直流锅炉和炉水循环泵组合形成的，其工质在蒸发受热面中的流动如图 1-3(d) 所示。复合循环锅炉的基本工作方式：锅炉在低负荷时蒸发受热面内工质有循环，锅炉在高负荷时按直流方式工作，即工质一次通过蒸发受热面。

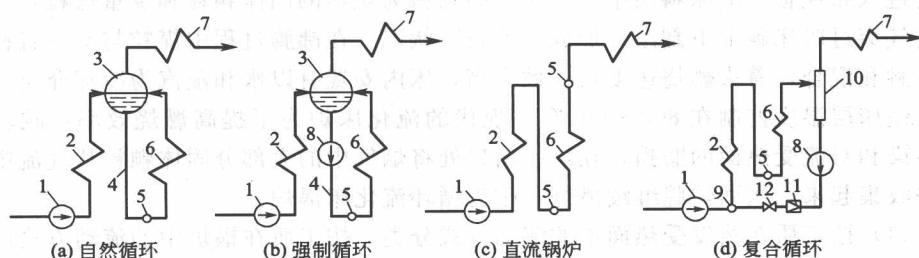


图 1-3 工质在蒸发受热面的流动方式

- 1—给水泵；2—省煤器；3—锅炉汽包；4—下降管；5—联箱；
6—水冷壁；7—过热器；8—炉水循环泵；9—混合器；
10—汽水分离器；11—逆止阀；12—调节阀

第二节 电站锅炉的技术状况和发展概况

一、我国电站锅炉的发展

近几十年来，世界发达国家的电力工业得到了飞速发展，特别是计算机和耐温

金属材料的开发和应用,为电站锅炉向高参数、大容量、高自动化发展提供了强有力的技术支持。目前,在工业发达的国家中,与 600MW 汽轮发电机组配套的 2000t/h 超临界压力的大型电站锅炉已相当普遍。美国自 1972 年就已有与 1300MW 配套的 4400t/h 超临界压力的锅炉投入运行,日本 1974 年就已有与 1000MW 汽轮发电机组配套的 3180t/h 超临界压力的锅炉投入运行。

此外,随锅炉参数、容量的提高,在工质的循环方式上,除自然循环锅炉外,又发展了强制循环锅炉。在燃烧方式上,为适应劣质煤的燃烧、降低氮氧化物和二氧化硫等有害气体的污染,循环流化床锅炉也得到了较快的发展。在燃烧技术上,为适应劣质煤燃烧,减轻污染,相继研制开发了低氮氧化物燃烧器、旋流燃烧器等。

与发达国家的电力工业相比,我国电力工业的发展起步较晚,新中国成立前根本就没有自己的锅炉制造业。新中国成立后,先后在哈尔滨、上海、四川、北京、武汉等地建立了锅炉生产基地,20 世纪 50 年代后期设计制造了与 50MW 汽轮发电机组配套的容量为 230t/h 的锅炉。20 世纪 60~70 年代,我国的电力工业有了较快的发展,到 70 年代末,已先后设计制造了与 125MW、200MW、300MW 汽轮发电机组配套的容量为 400t/h、670t/h、1000t/h 高压、超高压、和亚临界压力的锅炉。20 世纪 80 年代中期,我国先后引进并制造了与 300MW、600MW 汽轮发电机组配套的 1025t/h、2008t/h 的亚临界压力的锅炉。现在,我国已有能力自行设计并制造与 600MW 汽轮发电机组配套的 2000t/h 级的超临界两次中间再热的电站锅炉。国产电站锅炉的生产状况如表 1-2 所示。

表 1-2 国产电站锅炉的生产状况

容量 /(t/h)	蒸汽压力 /MPa	过热/再热 蒸汽温度 /℃	给水温度 /℃	配套汽轮 发电机功 率/MW	锅炉类型
35	3.8(39)	450	150	6	中压自然循环室燃煤粉炉、层燃炉
65			150	12	中压自然循环层燃炉
75			150	12	中压自然循环室燃煤粉炉
120			170	25	中压自然循环室燃煤粉炉
130			170	25	中压自然循环室燃煤粉炉
220	9.8(100)	540	215	50	高压自然循环室燃煤粉炉或 燃用渣油高压自然循环煤粉炉
230		510		50	
410		540		100	
400	13.7(140)	555/555	240	125	超高压自然循环锅炉或直流炉 (带中间再热器),燃用煤 或油超高压自然循环锅炉
670		540/540		200	(带中间再热器),燃用煤或油
935		570/570		300	亚临界压力直流锅炉(带中 间再热器),燃煤亚临界压力自 然循环锅炉、强制循环锅炉、直流 锅炉(带中间再热器),燃煤或燃油
1000~ 1025	16.7	260			
2008	18.3	540.6/540.6	278.3	600	亚临界压力强制循环锅炉 (带中间再热器),燃煤

截至 2004 年 5 月底, 三大锅炉厂超临界锅炉已经生产和已经订货的统计, 制造 600MW 超临界机组锅炉的厂家: 哈尔滨锅炉厂 (46 台), 上海锅炉厂 (38 台), 东方锅炉厂 (43 台)。东方锅炉厂脚踏实地, 一步一个脚印地推动企业不断发展。截至 2002 年 12 月, 东方锅炉厂已累计生产了大小电站锅炉 317 台/45776MW。其中, 300MW 机组 60 台, 并具备了年产电站锅炉 11000MW、各类压力容器 8000t、1000MW 核电站重型核岛主设备以及军工产品配套的生产制造能力。上海锅炉厂有限公司的前身为美商慎昌洋行杨树浦工厂, 成立于 1925 年。上海锅炉厂是中国最早建成的锅炉制造企业, 40 余年来向国内外提供大量电站锅炉、核电设备、大型化工容器、工业锅炉、空气预热器、钢结构等, 产品遍布全国各地, 行销美国、加拿大、日本、古巴等 30 多个国家和地区。300MW 级火电、核电等机组已经进入国际市场。表 1-3 是上海锅炉厂生产的部分锅炉的应用情况。

表 1-3 上海锅炉厂生产的部分锅炉的应用情况

序号	电厂名称	机组	流量 (t/h)	压力 /MPa	温度 /℃	燃烧	本厂完工日期	电厂投 运日期	循环方式
1	吴泾热电厂	1	2008	17.5	541/541	烟煤	98/12	00/07	控制循环
2	吴泾热电厂	2	2008	17.5	541/541	烟煤	00/03	01/05	控制循环
3	台山电厂	3	2008	18.3	541/541	烟煤			控制循环
4	台山电厂	4	2008	18.3	541/541	烟煤			控制循环
5	国华定州发电有限公司	1	2008	17.47	540/540	烟煤			控制循环
6	国华定州发电有限公司	2	2008	17.47	540/540	烟煤			控制循环
7	嘉兴电厂	3	2008	17.47	540/540	烟煤			控制循环
8	嘉兴电厂	4	2008	17.47	540/540	烟煤			控制循环

哈尔滨锅炉厂 2004 年首次进入核电产品核心领域——核岛, 在大型联合循环余热锅炉、大型循环流化床锅炉及百万千瓦级高压加热器、预热器等新产品的市场开发上也实现了突破, 成功引进了日本三菱公司 600~1000MW 等级超超临界锅炉、脱硝技术, 完成了 600MW 超临界锅炉设计制造任务。国产首台 1000MW 超超临界锅炉和国产首台 300MW 大型循环流化床锅炉等一批代表当代国际最先进水平的电站锅炉研制生产工作进展顺利。为进一步降低每千瓦的设备投资、金属消耗、运行管理费用, 提高机组运行的经济性和安全性, 高参数、大容量、高自动控制技术的大型电站锅炉, 减轻环境污染已成为当今电站锅炉的发展趋势。

二、超超临界锅炉发展概况

火力发电中的主要环节是热能的传递和转换, 将初参数提高到超临界状态, 可以提高可用能的品位, 使热能转换效率提高。超超临界压力锅炉的发展正在电力行业悄然兴起。节约一次能源, 加强环境保护, 减少有害气体的排放, 降低地球的温室效应, 已越来越受到国内外的高度重视。我国电力总装机容量已逾 3 亿千瓦, 但

火电机组平均单机容量不足 10 万千瓦, 平均供电煤耗达 $399\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 比国外先进水平高 $270 \sim 280\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 高出 25% 以上, 资源浪费太大, 废气排放严重。从目前世界火力发电技术水平来看, 提高火电厂效率的方法除整体煤气化联合循环 (IGCC)、增压流化床联合循环 (PFBC) 外, 还有超超临界压力技术 (USC)。我国已经把大幅度提高发电效率、加速发展洁净煤技术的超超临界机组作为我国可持续发展、节约能源、保护环境的重要措施。

世界上第一台实验性的超临界锅炉是西门子公司根据捷克人马克·本生 1919 年的专利方案制造的。然后世界各发达国家竞相研究和生产超超临界机组, 1949 年前苏联安装了第一台超超临界试验机组, 直流锅炉出口参数为 29.4MPa 、 600°C (12t/h), 以后又生产了 29.4MPa 、 650°C 、 100MW 机组, 作为改造中压机组的前置级。1956 年德国投运 1 台参数为 34MPa 、 610°C 、容量为 88MW 的机组。美国在 20 世纪 50 年代末投运了 2 台具有代表性的超超临界机组——菲罗电厂 6 号机组, 容量为 125MW , 参数为 31MPa 、 621°C ; 艾迪斯顿电站参数为 34.3MPa 、 649°C , 容量为 325MW 。日本引进美国的技术并结合欧洲的适合变压运行的本生式直流炉, 成功地开发超超临界机组, 在 1989 年和 1991 年成功地投运 2 台 700MW 、 31MPa 、 566°C 的机组, 运行情况良好, 可用率水平很高。1998 年投运主蒸汽和再热蒸汽温度均为 600°C 的原町 21 号 1000MW 机组, 该机组实测发电机端效率达 44.7%。

目前, 国际上已经投运了单机在 800MW 以上火电机组的国家主要有美国、日本、前苏联和德国等。美国首台 1000MW 机组 (燃油、亚临界) 于 1965 年在 Ravens Wood 电厂投运, 大容量机组在 20 世纪 60 年代出现了飞速发展, 进入 70 年代后由于燃料发生变化影响机组可用率, 大容量火电机组不适应调峰等因素, 其发展趋于停滞, 机组设计趋于保守, 主力机组为 $500 \sim 800\text{MW}$ 。ALSTOM Power, Inc, USA (原美国燃烧工程公司) 于 1976 年和 1978 年为美国旺斯利 (Wansley) 电站设计并制造的两台 952MW 超临界锅炉分别成功投入运行。

前苏联发电机组的发展按国家计划进行, 机组容量统一, 规定为 500MW 、 800MW 、 1200MW 。锅炉出口蒸汽压力为 25MPa , 蒸汽温度最初为 $565^\circ\text{C}/570^\circ\text{C}$, 后因材料原因降至 $545^\circ\text{C}/545^\circ\text{C}$ 。首台 800MW 机组 1967 年于斯拉维斯克电厂投运。由于 1200MW 机组与 800MW 机组相比经济性没有明显优势, 而可靠性尚需稳步提高, 再加上社会和电网原因, 没有再建造 1200MW 及以上机组。

欧洲在 1995~1999 年间至少投运 9 台蒸汽压力为 $28.5 \sim 31.0\text{MPa}$ 、温度为 $545 \sim 587^\circ\text{C}$ 的超超临界机组, 在建的还有 10 台, 并将蒸汽温度提高至 600°C 以上。其中丹麦已投运的 2 台超超临界机组的热效率可达 47%~49%。

目前在建的韩国 Yonghung 超临界电厂有两台 800MW 机组, 采用了滑压、螺旋水冷壁的技术, 过热器出口压力为 25MPa , 过热器出口温度为 569°C , 再热器出口温度为 569°C 。

随着参数的提高, 对材料的要求、产品开发的技术难度、机组的造价也越来越

高。随着科技的不断发展,到2005年超超临界机组的参数为33.5MPa、630℃;到2015年机组参数可达40.0MPa、720℃。

超超临界压力锅炉的关键技术是多方面的,在设计和制造上都有高难技术,如材料的选择、水冷壁系统及其水动力安全性、受热面布置、二次再热系统汽温的调控等,其中热强度性能高、工艺性好、价格低廉的材料的发展是最关键的问题。超超临界压力锅炉的水冷壁系统主要集中在螺旋管圈水冷壁和由内螺纹组成的垂直管圈型式两种。超超临界压力锅炉要求较高的运行操作水平和自动控制水平。在开发超超临界压力机组时,有必要在现有的超临界压力水冷壁内沸腾传热研究的基础上扩展实验研究的压力范围,进一步进行试验研究,防止似膜态沸腾现象发生,确保水冷壁系统工作的安全性。在设计二次再热锅炉时,必须考虑到高效率在基本负荷下运行,决定最佳的再热器受热面布置和再热蒸汽温度控制方法。超超临界压力锅炉采用了二次中间再热系统,蒸汽温度的控制要比一次再热机组复杂得多。

美国和前苏联在发展超超临界机组的初期遇到很多问题,机组的可靠性低,主要原因是选用了过高的参数,对超高的参数当时的技术发展水平(特别是材料)是不可能达到的。现在国外改进开发的材料已满足了超超临界压力机组的要求。据美国EPR的统计,超超临界机组的可用率已达90%以上。

超超临界机组的热效率高,与常规的超临界机组相比较,至少可节约燃料4%~5%。运行实践也表明,超超临界机组的变压运行方式能较好地满足调峰的要求。新一代大容量超超临界燃煤机组已具备了优良的经济、环保和启动调峰运行性能,并在低负荷时仍然保持较高的效率。从我国国情出发,发展超超临界机组有利于降低我国平均供电煤耗,有利于电网调峰的稳定性和经济性,有利于保护生态环境。与同容量亚临界火电机组比较,超临界机组可提高效率2%~2.5%,超超临界机组可提高效率约5%。火力发电机组采用大容量和超临界参数燃煤机组是降低发电煤耗的主要途径之一。

随着超临界直流锅炉向着高效、节能方向发展,锅炉部件的过热器和再热器材料也向高强度、高耐蚀性的新型热强钢和奥氏体合金钢发展。目前在600~700℃工作温度下可选用钢种有HR3C、Super304H、SA-213 TP347HFG、SA-335P92、SA-376TP347H等,上海锅炉厂在引进开发百万等级的超(超)临界直流锅炉新技术的同时,针对上述新的材料进行了焊接工艺和冷作工艺试验,已将这些材料成功用于超临界锅炉等产品制造中。

20世纪90年代初,日本住友金属工业株式会社为超(超)临界锅炉的过热器和再热器开发研制了HR3C(25Cr-20Ni-Nb)和Super304H(18Cr-9Ni-3Cu-Nb)钢,该类钢在600~700℃的许用应力比SA-213 TP347H高20%以上,并基于精细析出的粒子具有良好的耐蒸汽氧化性和良好的可焊性。由于Super304H钢具有No.7及更精细的晶粒尺寸,其耐蒸汽氧化性大致与具有极细晶粒尺寸的SA-213 TP347HFG相同,而比SA-213 TP321H或SA-213 TP316H优越;HR3C是在TP310H钢基础上开发研制出的新钢种,因其含Cr、Ni量比Super304H高,因此

HR3C 钢在 650~700℃ 的抗高温蒸汽氧化腐蚀能力比 Super304H 强。通过试验研究,掌握了此类细晶粒不锈钢的焊接特性和冷作工艺性能,得到了与母材性能相当的焊接接头,其 650℃ 高温蠕变强度比 SA-213 TP347H 高近 50%。研究成果已应用于 600MW 超临界锅炉产品制造中。

SA-335P92 (9Cr-1.8W) 钢是在 9Cr 钢的基础上添加了 1.8% 的钨, E911 (9Cr-1Mo-1W) 钢是在 P91 钢的基础上添加了 1.0% 的钨。此类材料在 600~650℃ 下的高温蠕变强度比 P91 高的多,因为钨能提高高温强度和蠕变断裂强度,但也使焊缝金属形成过剩的 δ -铁素体,降低焊缝机械性能。通过试验研究,一个能得到较高焊接接头综合性能的工艺规范以及如何控制预热、后热温度的措施,已在 600MW 超临界锅炉制造中推广使用。

随着锅炉主蒸汽出口温度的不断提高,选用奥氏体不锈钢大口径钢管作为集箱、管道的本体材料将越来越普遍。SA-376 TP347H 钢是适用于高温中央电站用无缝奥氏体钢管,它在 600~700℃ 的高温蠕变强度和耐蒸汽氧化性能比 P92 要高,可不预热焊接。通过工艺试验研究,TP347H 集箱的制造难点已被我国技术人员所掌握,并于 2002 年初为金山石化公司生产制造了 2 根转化炉余热锅炉的 TP347H 不锈钢集箱,现电厂锅炉运行正常。

超临界锅炉与亚临界汽包锅炉在自动控制方面有所不同,其实质是直流锅炉与汽包锅炉之间的差别,因为超临界锅炉必须是直流锅炉。直流炉与汽包炉在运行原理及特性上有较大差别,因此自控设计人员要了解超临界锅炉的设计特点,在软件设计中将直流锅炉特点以量化加以贯彻。在汽包锅炉中给水流量的变化仅影响汽包水位,而在燃料量变化时又仅仅改变蒸汽压力和流量,因此锅炉给水量、燃料量、汽温控制等都是相对独立的,亦即:给水→水位;燃料→产汽量及汽压;喷水→汽温。在直流锅炉中,由于没有汽包,蒸发与过热受热面之间没有固定的分界线,当给水量或燃料量变化时都会引起蒸发量、汽温和汽压的同步变化,相互有牵制,关系密切,这样给控制系统的设计和调整增加了灵活性,也增添了复杂性。不过,如果掌握了直流锅炉的运行特性及控制经验,对超临界锅炉的自控也就不成为难题,现有的自控设计理念和先进的装备已足够满足要求。随着超临界机组蒸汽压力的升高,直流锅炉中间点汽温(通常取启动分离器出口汽温)和过热器出口汽温控制点的温度变动惯性增加(亦即比热容增加),时间常数和延迟时间相应增大,在燃料或给水量扰动时,超临界锅炉蒸汽温度变化具有更大惯性。在超临界机组启动和低负荷(小于最低直流负荷)运行期间,必须投入启动系统,因此也增加了锅炉启动系统对控制的要求。

从以上几点可知,超临界锅炉更难以控制,情况更复杂一些。在规定的运行工况下,必须维持某些比例常数,而在变工况下必须使这些比例按一定规律变化,而在启动和低负荷时,要求更大幅度地改变这些比例,以得到宽范围领域的自动控制。为此,必须设计更完善的闭环控制系统,在启动工况更多地采用变参数定值技术,所有控制功能应在前馈技术的基础上完成,并连续地校正控制系统的增益。