



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

电厂锅炉

王灵梅 主编



★ 本书配课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

电厂锅炉

主编 王灵梅
编写 邢德山 蔡新春 李东雄
苏利红 车 丹 杜海玲
主审 阎维平



YZLI0890173198



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书主要讲述大型火力发电厂燃煤锅炉,包括煤粉锅炉和循环流化床锅炉的原理及设备。具体内容有:电厂锅炉概述,锅炉设备、系统及其工作原理,燃料及燃料燃烧计算,锅炉热平衡计算和试验方法,燃料制备系统及设备,燃烧理论基础和燃烧设备,蒸发设备,过(再)热设备,自然循环锅炉,控制流动锅炉,蒸汽净化,锅炉运行及事故处理方法。

本书为高等院校热能动力工程专业电厂锅炉课程用书,适用于热能动力工程类各专业方向的学生,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电厂锅炉 / 王灵梅主编. —北京: 中国电力出版社, 2013.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5123-0329-4

I. ①电… II. ①王… III. ①火电厂—锅炉—高等学校—教材 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 066381 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 622 千字
定价 46.00 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

前言

节能减排是国家确定的经济社会发展的重大战略任务。火电企业既是优质清洁能源的创造者，又是一次能源消耗大户和污染排放大户，因而也是国家实施节能减排的重点领域。为满足节能减排的要求，我国电厂锅炉发展趋势一是煤粉锅炉大型化；二是大力发展循环流化床锅炉技术；三是整体煤气化联合循环 IGCC、多联产将成为国家发展绿色煤电的重要形式，气化炉是其中的核心设备。本书的编写目的是为适应我国电厂锅炉发展的迫切需求，提高学生在火电厂、火电建设公司、企业自备电厂或动力分厂从事火电机组安装与检修、机组设备运行与管理等工作时快速适应的能力。

本书希望体现以下特色：

(1) 密切结合热能动力工程类专业发展的教学要求。

(2) 内容体系紧贴我国电厂锅炉的现状及国内外的新技术、新成果和电厂锅炉运行实践，以大型煤粉锅炉为主干，同时将循环流化床锅炉、气化炉内容纳入其中，并围绕主要设备、工作原理及运行技术进行编写。

(3) 燃料内容中增加煤矸石等燃料。

本书第一～第三章由苏利红编写；第四～第八章由李东雄编写；第九～第十章由车丹编写；第十一～第十五章由邢德山、杜海玲编写；第十六章由蔡新春编写。全书由王灵梅主编。

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大专家和读者批评指正。

编者

2012年10月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 电厂锅炉的作用及设备构成	1
第二节 电厂锅炉设备的基本特征	4
第三节 电厂锅炉的容量、参数及分类	9
第四节 电厂锅炉技术的发展趋势	13
第五节 煤的气化技术	16
第二章 电厂锅炉用燃料及燃料燃烧计算	18
第一节 煤的成分及其主要特征	18
第二节 燃料燃烧计算	29
第三节 烟气分析方法	36
第四节 空气和烟气焓的计算	40
第三章 电厂锅炉机组热平衡	42
第一节 电厂锅炉热平衡	42
第二节 电厂锅炉输入热量和有效利用热量	43
第三节 电厂锅炉的各项热损失	44
第四节 锅炉热平衡试验方法	53
第四章 燃料制备系统及设备	58
第一节 煤粉的性质	58
第二节 磨煤机	61
第三节 煤粉制备系统	75
第四节 煤粉制备系统的主要辅助设备	79
第五节 循环流化床锅炉的碎煤、给煤设备及系统	85
第五章 煤粉燃烧的理论基础和燃烧设备	94
第一节 煤粉燃烧的基本理论	94
第二节 煤粉气流着火和燃烧	99
第三节 煤粉燃烧器和点火设备	105
第四节 燃烧调整试验	127
第六章 蒸发设备	131
第一节 概述	131
第二节 汽包	133
第三节 水冷壁的作用和结构	139
第四节 水冷壁的布置形式	143
第五节 蒸发受热面存在的问题及其防止措施	147
第七章 过热器和再热器	151
第一节 过热器和再热器的作用及其特点	151

第二节	过热器和再热器的结构形式及汽温特性	152
第三节	热偏差	164
第四节	蒸汽温度的调节	167
第五节	过热器与再热器的积灰和高温腐蚀	174
第八章	省煤器和空气预热器	179
第一节	省煤器	179
第二节	空气预热器	184
第三节	尾部受热面的布置	193
第四节	尾部受热面的积灰、磨损和腐蚀	195
第九章	自然循环锅炉	203
第一节	自然循环的基本原理	203
第二节	汽液两相流的流型及传热	205
第三节	汽液两相流的流动参数及流动阻力	208
第四节	自然循环锅炉的常见故障及可靠性指标	214
第五节	提高自然循环锅炉的安全性措施	218
第六节	蒸汽净化及汽包内部装置	220
第十章	控制流动锅炉	227
第一节	控制流动锅炉的类型及特点	227
第二节	控制循环汽包锅炉	227
第三节	直流锅炉	230
第四节	直流锅炉的流动特性	234
第五节	直流锅炉存在的问题及防止措施	241
第六节	超临界压力锅炉	245
第十一章	锅炉热力计算及其设计布置	253
第一节	电厂锅炉整体布置及其主要设计参数的选择	253
第二节	电厂锅炉热力计算的任务及顺序	258
第三节	炉膛热力计算	259
第四节	对流和半辐射受热面的热力计算	265
第五节	CFB 锅炉炉膛热力计算简介	283
第十二章	循环流化床锅炉基础理论	289
第一节	循环流化床锅炉的基本概念	289
第二节	流态化基本原理	291
第三节	炉内流体动力特性	294
第四节	炉内传热特点分析	296
第五节	燃烧过程分析	298
第十三章	物料循环和燃烧系统	303
第一节	炉膛及布风装置	303
第二节	点火装置	310
第三节	气固分离器	312
第四节	固体物料回送装置	315
第五节	外置换热器	317

第十四章 辅助设备及系统..... 320

 第一节 风烟系统..... 320

 第二节 冷渣与除灰渣系统..... 321

 第三节 石灰石脱硫系统..... 325

第十五章 大型循环流化床锅炉的发展、主要炉型与技术特点..... 328

 第一节 国外循环流化床锅炉的主要技术流派与发展..... 328

 第二节 国产 300MW 等级循环流化床锅炉技术特点..... 331

第十六章 锅炉典型事故分析及预防..... 339

 第一节 炉膛结渣..... 339

 第二节 高温腐蚀..... 351

 第三节 高温受热面超温爆管..... 356

 第四节 管内酸及碱腐蚀..... 367

 第五节 受热面飞灰的磨损..... 372

附录 锅炉热力计算相关系数附图..... 384

参考文献..... 398

第一章 绪 论

第一节 电厂锅炉的作用及设备构成

电力是实现工业、农业、交通运输和国防现代化的主要动力,在国民经济各个方面起到决定性的作用,是国民经济发展的基础,也是提高和改善人民物质文化生活水平的重要条件。电能是二次能源。发电的形式很多,有火力发电、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。从总体上讲,火力发电仍是目前世界大多数国家电能生产的主要形式,我国由于能源构成的特点更是如此。

一、电厂锅炉的作用

电能的生产企业称为发电厂。火力发电厂的生产过程可简要地如图 1-1 所示。

燃料在锅炉 1 中燃烧,燃烧放出的热量把进入锅炉的给水加热、蒸发并过热成具有一定压力和温度的过热蒸汽,然后过热蒸汽沿管道进入汽轮机 2 膨胀做功,高速气流推动汽轮机的转子并带动发电机 3 的转子一起旋转从而发出电能,蒸汽在汽轮机内做完功后排入凝汽器 4,在凝汽器中被循环水泵提供的冷却水冷却而凝结成水。

凝结水经凝结水泵 5 升压后进入低压加热器

6 加热,然后送至除氧器 7,水在除氧器中被来自抽汽管的汽轮机抽汽加热并除去所含的气体(氧气、二氧化碳、氮气、氨气等),然后经给水泵 8 升压,再经高压加热器 9 进一步加热后送入锅炉,继续重复上述循环过程。水在加热器和除氧器内加热的热源均来自汽轮机的各级抽汽 10。汽水系统中的蒸汽和水总会有一些损失,故需要不断向系统补充经过化学处理的水,补充水通常送入除氧器或凝汽器中。

由此可见,在火力发电厂中存在着三种形式的能量转换过程:在锅炉中燃料的化学能转化为蒸汽的热能;在汽轮机中蒸汽的热能转化为机械能;在发电机中机械能转化为电能。进行能量转换过程的主要设备为锅炉、汽轮机和发电机,通常它们被称为发电系统的三大主机。

锅炉是火力发电厂的三大主机中最基本的能量转换设备,发电用的锅炉称为电厂锅炉。其作用是使燃料在炉内燃烧放热,并将锅内工质由水加热成具有足够数量和一定质量(汽温、汽压),且具有一定洁净度的过热蒸汽,供汽轮机使用。

二、电厂锅炉设备构成及工作概况

1. 煤粉炉的设备构成及工作概况

目前我国电厂锅炉所用燃料主要是煤。现代大型电厂锅炉一般先把原煤磨制成煤粉,然后送入锅炉燃烧放热并产生过热蒸汽。在锅炉中实现煤的化学能转化为蒸汽热能时,共进行四个相互

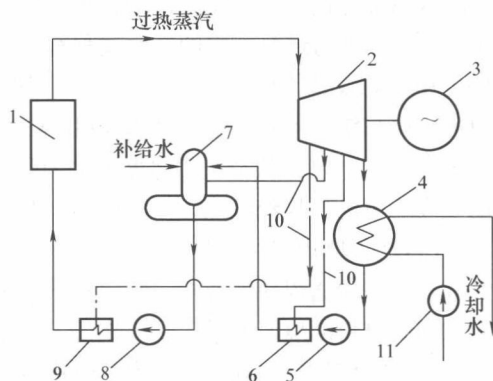


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

- 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—汽轮机抽气管; 11—循环水泵

关联的工作过程，即煤粉制备过程、燃烧过程、通风过程和过热蒸汽的生产过程。煤粉制备过程的任务是将初步破碎后送入锅炉房的原煤磨制成符合锅炉燃烧要求的细小煤粉颗粒，供锅炉燃烧。燃烧过程的任务是使燃料燃烧放出热量，产生高温火焰和烟气。为了使燃烧过程稳定持续地进行，必须连续提供燃烧需要的助燃氧气和将燃烧产生的烟气即时引出锅炉，这就是锅炉的通风过程。过热蒸汽生产过程的主要任务是通过各换热设备将高温火焰和烟气的热量传递给锅炉内的工质。

锅炉设备一般是由锅炉本体和锅炉辅助设备组成的。锅炉本体主要包括炉膛、燃烧器、布置有受热面的烟道、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器、联箱等。锅炉辅助设备主要有送风机、引风机、给煤机、磨煤机、排粉机、除尘器及烟囱等。

锅炉设备中与燃料燃烧有关的煤、风、烟系统称为锅炉的燃烧系统，锅炉的“炉”即泛指燃烧系统。燃烧系统由燃烧设备炉膛、燃烧器、空气预热器、通风设备（风机），以及烟风道组成，主要任务是保证燃料有效放热。与燃烧系统同时工作的还有汽水系统，锅炉的“锅”即泛指汽水系统。汽水系统是指水和蒸汽流经的许多设备（其中包括各种受热面、汽包联箱和若干连接管道）所组成的系统，是与过热蒸汽的产生过程有关的系统，需要承受一定的压力和温度。下面以图 1-2 所示的煤粉锅炉设备为例，并把它的工作过程概括为燃烧系统和汽水系统的工作过程来加以叙述。

（1）燃烧系统。外界冷空气经送风机 14 升压后送入锅炉尾部的空气预热器 5，冷空气在空气预热器内被烟气加热。从空气预热器出来的热空气分成两部分进入锅炉。

由煤仓落下的原煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 中，同时从空气预热器出来的一部分热空气经排粉机 13 也送入磨煤机中，在磨煤机中对煤进行加热、干燥并磨制成煤粉。送入磨煤机的这部分热空气本身也是输送煤粉的介质，把已磨制好的煤粉带出磨煤机。这样从磨煤机排出的煤粉和空气的混合物经煤粉燃烧器 8 进入炉膛燃烧。由空气预热器来的另一部分热空气直接经燃烧器进入炉膛与已着火的煤粉气流混合，并参与燃烧反应。

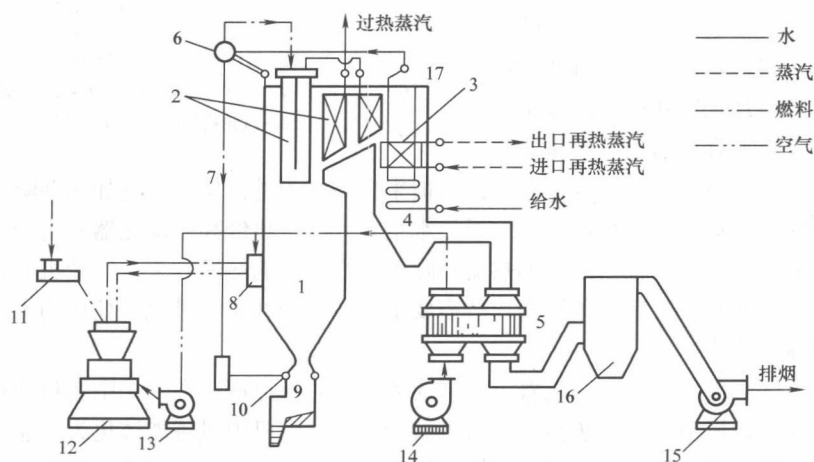


图 1-2 煤粉锅炉及辅助设备示意图

- 1—炉膛及水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；7—下降管；
8—燃烧器；9—排渣装置；10—水冷壁下联箱；11—给煤机；12—磨煤机；13—排粉机；14—送风机；
15—引风机；16—除尘器；17—省煤器出口联箱

煤粉气流经煤粉燃烧器 8 进入炉膛后，在炉膛内进行悬浮燃烧。燃烧火焰中心温度为 1500°C 或更高。炉膛空间很大，在炉膛周围布置大量的水冷壁管，炉膛上布置顶棚过热器及屏式过热器，

这些受热面管内有工质水和蒸汽流过，都是辐射受热面。高温火焰和烟气在炉膛内向上流动时，主要以辐射换热的方式把热量传递给水冷壁管及过热器管内的水和蒸汽，这些辐射受热面既能吸收炉膛的辐射热使火焰温度降低，又能保护炉墙使其不致被烧毁。为了防止熔化的灰渣黏结在烟道内的受热面上，烟气向上流动达到炉膛上部出口时，其温度应低于煤灰的熔点。

由于煤中含有灰分，煤粉燃烧所生成的较大灰粒不能随烟气上升而逐渐沉降于炉膛底部的冷灰斗中冷却和凝固，落入排渣装置 9 时已呈固态，形成固态排渣。大量较细的灰粒随烟气上升流动，在上升过程中也逐渐被冷却，到达炉膛出口时已经凝固或者成为不太黏的灰粒，这些随烟气流动的细灰称为飞灰。携带飞灰的高温烟气经炉膛上部出口离开炉膛进入水平烟道，然后再向下流动进入垂直烟道。在锅炉本体的烟道内布置有过热器 2、再热器 3、省煤器 4 和空气预热器 5 等受热面，烟气在流过这些受热面时主要以对流换热方式将热量传递给工质，这些受热面是对流受热面，布置这些受热面的烟道称为对流烟道。烟气流经一系列对流受热面，不断放出热量逐渐冷却下来。在现代锅炉的烟气出口端都装有空气预热器，离开空气预热器的烟气即锅炉排烟，其温度已相当低，通常为 $110\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。由于煤粉锅炉的烟气中携带飞灰量很大，为了防止环境污染，锅炉排烟（离开空气预热器的烟气）首先要经过除尘器 16，使大部分飞灰被捕捉下来，防止环境污染及磨损引风机。最后，只带有少量细微灰粒的比较清洁的烟气通过引风机 15 由烟囱排入大气。

(2) 汽水系统。送入锅炉的水称为给水。由送入的给水到送出的过热蒸汽，中间要经过一系列加热过程。首先把给水加热到饱和温度，其次是饱和水的蒸发(相变)，最后是饱和蒸汽的过热。给水经省煤器加热后进入汽包锅炉(以汽包锅炉为例)的汽包 6，经下降管 7 引入水冷壁下联箱 10 再分配给各水冷壁管。水在水冷壁中继续吸收炉内高温烟气的辐射热达到饱和状态，并使部分水蒸发变成饱和蒸汽。水冷壁又称为锅炉的蒸发受热面。汽水混合物向上流动并进入汽包，在汽包中通过汽水分离装置进行汽水分离，分离出的饱和水与通过省煤器 4 进入锅炉的给水混合后流入下降管 7，继续往复循环分离出来的饱和蒸汽进入过热器吸热变成过热蒸汽。由过热器出来的过热蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机做功。为了提高锅炉—汽轮机组的循环效率，对高压机组大都采用蒸汽再热，即在汽轮机高压缸做完部分功的过热蒸汽被送回锅炉进行再加热。这种对过热蒸汽进行再加热的锅炉设备叫做再热器，或称二次过热器。

过热器和再热器主要布置在烟气温度较高的区域，称高温受热面，省煤器和空气预热器布置在烟气温度较低的区域，故称为低温受热面或尾部受热面。

当送入锅炉的给水含有杂质时，其杂质浓度随着锅水的汽化而升高，严重时甚至在受热面上结成垢后使传热恶化。因此给水要进行处理。由汽包送出的蒸汽可能因带有含杂质的锅水而被污染，高压蒸汽还能直接溶解一些杂质。当蒸汽进入汽轮机后，随着膨胀做功过程的进行，蒸汽压力下降，所含杂质会部分沉积在汽轮机的通流部分，影响汽轮机的出力、效率和工作安全。因此，不仅要求锅炉能供给一定压力和温度的蒸汽，还要求蒸汽具有一定的洁净度。

2. 循环流化床锅炉的设备构成及工作概况

循环流化床锅炉可分为两个部分。第一部分由流化床燃烧室、气固分离设备、固体物料再循环设备和外置换热器（有些循环流化床锅炉无此设备）等组成，上述部件形成了一个固体物料循环回路。第二部分为尾部对流烟道，布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等，与常规煤粉锅炉相近。

(1) 燃烧系统。流化床燃烧是床料在流化状态下进行的一种燃烧，其燃料可以为化石燃料、工农业废弃物和各种劣质燃料。一般粗重的粒子在燃烧室下部燃烧，细粒子在燃烧室上部燃烧。被吹出燃烧室的细粒子采用各种分离器收集下来之后，送回床内循环燃烧。图 1-3 所示为循环流

化床锅炉的工作过程。

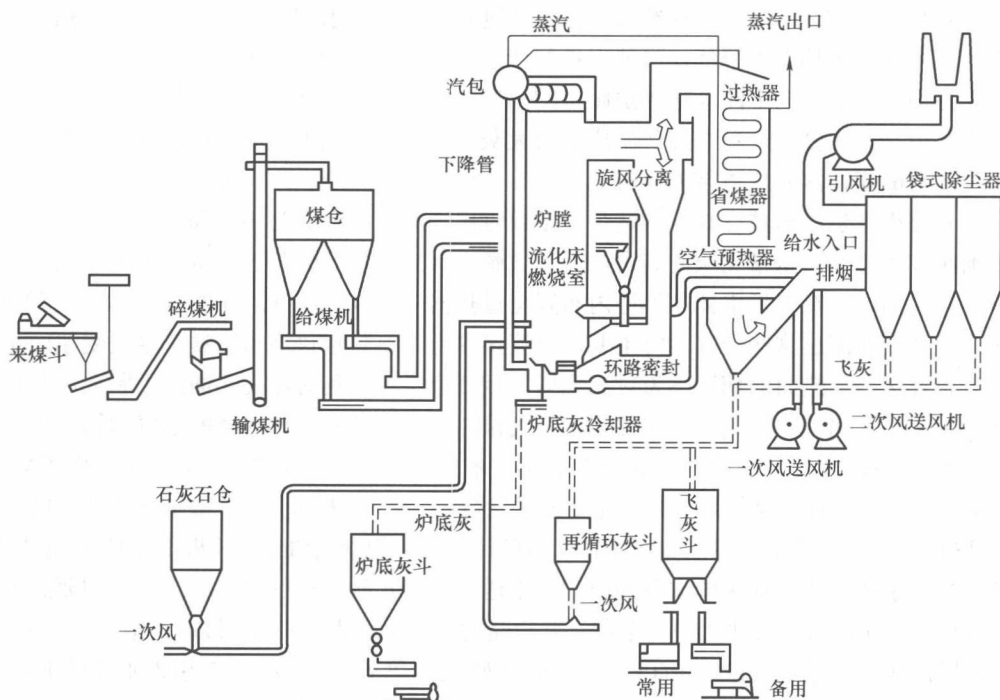


图 1-3 循环流化床锅炉工作过程

在燃煤循环流化床锅炉的燃烧系统中，燃料煤首先被加工成一定粒度范围的宽筛分煤，然后由给料机经给煤口送入流化床密相区进行燃烧，其中许多细颗粒物将进入稀相区继续燃烧，并有部分随烟气飞出炉膛。飞出炉膛的大部分细颗粒由固体物料分离器分离后，经返料器送回炉膛，再参与燃烧。燃烧过程中产生的大量高温烟气流经过热器、再热器、省煤器、空气预热器等受热面进入除尘器进行除尘，最后由引风机排至烟囱进入大气。循环流化床锅炉燃烧在整个锅炉内进行，而且炉膛内具有很高的颗粒浓度，高浓度颗粒通过床层、炉膛、分离器和返料装置，再返回炉膛，进行多次循环，颗粒在循环过程中进行燃烧和传热。

(2) 汽水系统。锅炉给水首先进入省煤器，然后进入汽包，经下降管进入水冷壁。燃料燃烧所产生的热量在炉膛内通过辐射和对流等传热形式由水冷壁吸收，用以加热给水生成汽水混合物。生成的汽水混合物进入汽包，在汽包内进行汽水分离。分离出的水进入下降管继续参与水循环，分离出的饱和蒸汽则进入过热器系统继续加热成为过热蒸汽。

锅炉生成的过热蒸汽引入汽轮机做功，将热能转化为汽轮机的机械能。一般 125MW 及以上机组锅炉布置有再热器，这些机组中的汽轮机高压缸排气将进入锅炉再热器进行加热，再热后的蒸汽进入汽轮机中、低压缸继续做功。

第二节 电厂锅炉设备的基本特征

一、电厂锅炉的主要特性

表征电厂锅炉设备的主要特性有以下方面：锅炉容量、蒸汽参数、给水温度、汽水流动方式、

燃烧方式和锅炉整体布置等。

1. 锅炉容量

锅炉容量即锅炉的蒸发量，是指锅炉每小时所产生的蒸汽量，用符号 D_e 表示，单位是 t/h 或 kg/s。

对于大型锅炉，锅炉容量又分为额定蒸发量（BRL）和最大连续蒸发量（BMCR）两种。

蒸汽锅炉的额定蒸发量（BRL）是指在额定蒸汽参数和给水温度，燃用设计煤种，并保证热效率时所规定的蒸发量。

蒸汽锅炉的最大连续蒸发量（BMCR）是指在额定蒸汽参数、给水温度和燃用设计煤种时，长期连续运行时所能达到的最大蒸发量。

锅炉容量是说明锅炉产汽能力大小的特性参数。

习惯上，电厂锅炉容量也用与之配套的汽轮发电机组的电功率来表示，如 600MW 锅炉。

2. 蒸汽参数

锅炉的蒸汽参数是指锅炉出口处的蒸汽温度和蒸汽压力。蒸汽温度常用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K；蒸汽压力常用符号 p 表示，单位为 MPa。

额定蒸汽压力是指锅炉在规定的给水压力和负荷范围内，长期连续运行时应保证的出口蒸汽压力。

额定蒸汽温度是指锅炉在规定的负荷范围内，在额定蒸汽压力和额定给水温度下，长期连续运行所必须保证的出口蒸汽温度。对生产过热蒸汽的锅炉，则需标明蒸汽压力和温度。

对于装有再热器的电厂锅炉，锅炉的蒸汽参数除额定过热蒸汽参数外，还应包括额定再热蒸汽参数。

3. 给水温度

锅炉给水温度是指给水在省煤器入口处的温度，用符号 t_{gs} 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

4. 汽水流动方式

锅炉的受热面，包括加热水的省煤器、使水汽化的蒸发受热面和加热蒸汽的过热器，一侧吸收烟气的热量，另一侧把热量传给水或蒸汽。不论哪种受热面，都应能随时把热量带走以保证受热面金属的正常工作，所以其内部工质应不断流动。锅炉省煤器中的工质（水）和过热器中的工质（蒸汽）都是一次流过受热面。给水流经省煤器的阻力由给水泵提供的压头来克服，过热器中蒸汽的流动阻力则是由压力降来克服的，即在过热器进口和出口之间存在压力差。流经蒸发受热面的工质为水和蒸汽的混合物，对于不同结构的锅炉，汽水混合物可能一次或多次流经蒸发受热面，所谓汽水流动方式就是推动汽水混合物流动的方式。

5. 燃烧方式

对于不同燃料，锅炉的燃烧方式不同，锅炉的结构也不一样。锅炉的燃烧方式可分为层燃燃烧方式、悬浮燃烧方式、旋风燃烧方式和流化床燃烧方式等，其中悬浮燃烧方式常见的火焰类型有切向、U 型、W 型等。

6. 锅炉整体布置

锅炉整体布置是指炉膛、对流烟道，以及各级受热面之间的相对位置。

随锅炉容量、参数和燃料性质等具体条件的不同，会产生很多不同的整体布置方案。比较典型的大中型锅炉的布置方案有 Π 型布置、塔型布置、箱型布置等。

电厂锅炉存在这样几个明显特点：电厂锅炉一般都是蒸发量在 400t/h 以上、超高压以上压力的锅炉，且大都进行中间再热，锅炉容量大、蒸汽参数高。大容量、高参数电厂锅炉热效率都很高，多稳定在 90% 以上。大型电厂锅炉为实现安全、经济运行，大都设置一套高度可靠的自动化

控制装置，自动化程度高。

二、电厂锅炉的安全和经济指标

除上述表征锅炉设备的基本特征外，锅炉特征还可以用锅炉的安全和经济指标来表示。

在工业生产中，尤其在火力发电厂中，锅炉是高温高压的大型设备，它的安全性和经济性对生产非常重要。

1. 锅炉的安全指标

(1) 锅炉连续运行小时数。锅炉连续运行小时数是指锅炉两次被迫停炉进行检修之间的运行小时数。

(2) 锅炉的可用率。锅炉的可用率是指在统计期间，锅炉总运行小时数及总备用小时数之和与该统计期间总小时数的百分比，即

$$\text{可用率} = \frac{\text{运行总小时数} + \text{备用总小时数}}{\text{统计期间总小时数}} \times 100\%$$

(3) 锅炉事故率。锅炉事故率是指在统计期间，锅炉总事故停炉小时数与总运行小时数和总事故停炉小时数之和的百分比，即

$$\text{事故率} = \frac{\text{事故停运小时数}}{\text{总运行小时数} + \text{事故停运小时数}} \times 100\%$$

2. 锅炉的经济性指标

(1) 锅炉效率。锅炉在运行时需要耗用一定量燃料，但燃料燃烧所释放出的热量不能完全被利用，有些燃料未能完全燃烧，锅炉排走的烟气也会带走一定热量等。锅炉效率是用来说明锅炉运行热经济性的重要指标。

锅炉效率的定义为：锅炉每小时的有效利用热量（即水和蒸汽所吸收的热量）占输入锅炉总热量的百分数。现代化大型电厂锅炉的热效率都在 90% 以上。

(2) 燃烧效率。要组织良好的燃烧过程，其标志就是尽量接近完全燃烧，也就是在炉内不结渣的前提下，燃烧速度快而且燃烧完全，得到最高的燃烧效率。燃烧效率可用下式表示，即

$$\eta_r = 100 - (q_3 + q_4), \%$$

式中 q_3 ——可燃气体未完全燃烧热损失；

q_4 ——固体未完全燃烧热损失。

(3) 锅炉净效率。只用锅炉效率来说明锅炉运行的经济性是不够的，因为锅炉效率只反映了燃烧和传热过程的完善程度，但从火力发电厂的作用看，只有供出的蒸汽和热量才是锅炉的有效产品，自用蒸汽消耗及排污水的吸热量并不向外供出，而是自身消耗或损失了。而且，要使锅炉能正常运行生产蒸汽，除使用燃料外，还要使其所有的辅助系统和附属设备正常运行，这也需要消耗能源。因此，锅炉运行的经济指标，除锅炉效率外，还有锅炉净效率。

锅炉净效率是指扣除了锅炉机组运行时的自用能耗（热耗和电耗）后的锅炉效率。

(4) 锅炉钢材耗用率。锅炉的投资在很大程度上取决于锅炉制造时的钢材耗用率。锅炉钢材耗用率是指锅炉单位蒸发量（1t/h）所耗用的钢材吨数，锅炉容量越小，蒸汽参数越高，则锅炉钢材耗用率越大。直流锅炉所用钢材约为同容量、同参数自然循环汽包锅炉的 70%。一般来说，电厂各种锅炉的钢材耗用率约在 2.5~5t/(t/h) 范围内。

三、环境指标

电厂锅炉燃烧是污染物的主要来源之一。防治环境污染，保护并改善生态环境，是火力发电行业技术进步和可持续发展的重要课题。

1. 污染物排放控制要求

GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》规定了火电厂大气污染物排放浓度限值、监测和监控要求，以及标准的实施与监督等相关规定。GB 13223—2011 于 2012 年 1 月 1 日起实施，自该标准实施之日起，火电厂大气污染物排放控制按该标准的规定执行。

自 2014 年 7 月 1 日起，现有火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 1-1 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气黑度排放限值。

自 2012 年 1 月 1 日起，新建火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 1-1 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气黑度排放限值。

自 2015 年 1 月 1 日起，燃烧锅炉执行表 1-1 规定的汞及其化合物污染物排放限值。

表 1-1 火力发电锅炉及燃气轮机组大气污染物排放浓度限值 mg/m³（烟气黑度除外）

序号	燃料和热能转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值	污染物排放监控位置
1	燃煤锅炉	烟尘	全部	30	烟囱或烟道
		二氧化硫	新建锅炉	100 200*	
			现有锅炉	200 400*	
		氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	全部	100 200**	
		汞及其化合物	全部	0.03	
2	以油为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟尘	全部	30	
		二氧化硫	新建锅炉及燃气轮机组	100	
			现有锅炉及燃气轮机组	200	
		氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	新建燃油锅炉	100	
			现有燃油锅炉	200	
			燃气轮机组	120	
3	以气体为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟尘	天然气锅炉及燃气轮机组	5	
			其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	10	
		二氧化硫	天然气锅炉及燃气轮机组	35	
			其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	100	
		氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	天然气锅炉	100	
			其他气体燃料锅炉	200	
			天然气燃气轮机组	50	
			其他气体燃料燃气轮机组	120	
4	燃煤锅炉，以油、气体为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟气黑度（林格曼黑度，级）	全部	1	烟囱排放口

* 位于广西壮族自治区、重庆市、四川省和贵州省的火力发电锅炉执行该限值。

** 采用 W 型火焰炉膛的火力发电锅炉，现有循环流化床火力发电锅炉，以及 2003 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的火力发电锅炉执行该限值。

重点地区的火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 1-2 规定的大气污染物特别排放限值。大气污染物特别排放限值的排放控制水平应达到国际先进或领先水平。

重点地区指根据环境保护工作的要求，在国土开发密度较高，环境承载能力开始减弱，或大气环境容量较小、生态环境脆弱，容易发生严重大气环境污染问题而需要严格控制大气污染物排放的地区。

执行大气污染物特别排放限值的具体地域范围、实施时间，由国务院环境保护行政主管部门规定。

表 1-2 大气污染物特别排放限值 mg/m³（烟气黑度除外）

序号	燃料和热能转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值	污染物排放监控位置
1	燃煤锅炉	烟尘	全部	20	烟囱或烟道
		二氧化硫	全部	50	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	全部	100	
		汞及其化合物	全部	0.03	
2	以油为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟尘	全部	20	
		二氧化硫	全部	50	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	燃油锅炉	100	
			燃气轮机组	120	
3	以气体为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟尘	全部	5	
		二氧化硫	全部	35	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	燃气锅炉	100	
			燃气轮机组	50	
4	燃煤锅炉，以油、气体为燃料的锅炉或燃气轮机组	烟气黑度（林格曼黑度，级）	全部	1	烟囱排放口

2. 大气污染物基准氧含量排放浓度折算方法

实测的火电厂烟尘、二氧化硫、氮氧化物和汞及其化合物排放浓度，必须执行 GB/T 16157—1996《固定污染源颗粒物测定和气象污染物采样方法》规定，并折算为基准氧含量排放浓度。各类热能转化设施的基准氧含量按表 1-3 的规定执行。

表 1-3 基 准 氧 含 量 mg/m³

序号	热能转化设施类型	基准氧含量 O ₂ (%)
1	燃煤锅炉	6
2	燃油锅炉及燃气锅炉	3
3	燃气轮机组	15

四、锅炉的型号

电厂锅炉的型号反映了锅炉的某些基本特征，我国目前采用的锅炉型号一般表示形式如下：

△△—XXX/XXX—XXX/XXX—△X

第一组为符号，是锅炉制造厂家的汉语拼音缩写。如 HG——哈尔滨锅炉厂，SG——上海锅炉厂，WG——武汉锅炉厂，BG——北京锅炉厂等。

第二组是数字。分子数字为锅炉容量，单位为 t/h；分母数字为锅炉出口过热蒸汽压力，单位为 MPa。

第三组也是数字。分子和分母数字分别表示过热蒸汽和再热蒸汽出口温度，单位为℃。

最后一组中，符号表示燃料代号，而数字表示设计序号。煤、油、气的燃料代号分别为 M、

Y、Q，其他燃料代号为 T。

例如：DG—670/13.7—540/540—M8 型锅炉即表示东方锅炉厂制造，锅炉容量为 670t/h，过热蒸汽压力为 13.7MPa（表压），过热蒸汽和再热蒸汽的出口温度为 540℃，设计燃料为煤，设计序号为第 8 次的锅炉。

第三节 电厂锅炉的容量、参数及分类

一、电厂锅炉的蒸汽参数及容量

20 世纪 80 年代以后，我国的火电机组以引进技术国产化为主，一批亚临界与超临界参数大容量火电机组相继投入运行。表 1-4～表 1-6 所示为我国电厂锅炉的蒸汽参数及容量，表 1-7 所示为国外超临界参数机组的发展方向。

表 1-4 中国电站锅炉的蒸汽参数及容量

蒸汽压力（MPa）	蒸汽温度（℃）	给水温度（℃）	MCR ^① （t/h）	发电功率（MW）
9.9	540	205～225	220，410	50，100
13.8	540/540	220～250	420，670	125，200
16.8～18.6	540/540	250～280	1025～2008	300，600
25.0～27.6	545/545～605/603	267～302	1900～3033	600，1000
25.0	545/545	267～277	1650～2650	500，800

① 最大连续蒸发量。

表 1-5 亚临界压力自然循环及控制循环锅炉的容量和参数

机组功率（MW）	300	300	300	600	600
循环方式	自然循环	控制循环	自然循环	自然循环	控制循环
过热蒸汽流量（t/h）	1025	1025	1025	2026.8	2008
再热蒸汽流量（t/h）	860	834.8	823.8	1704.2	1634
过热蒸汽压力（MPa）	18.2	18.3	18.3	18.19	18.22
再热蒸汽压力（MPa）	4.00/3.79	3.83/3.62	3.82/3.66	4.176/4.3	3.49/3.31
过热蒸汽温度（℃）	540	541	540	540.6	540.6
再热蒸汽温度（℃）	330/540	322/541	316/540	313.0/540.6	313.3/540.6
给水温度（℃）	276	281	278	276	278.33
燃煤量（t/h）	136.61	139.89	122.6	264.4	269.9
燃烧方式	四角燃烧	四角燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	四角燃烧

表 1-6 超临界和超超临界参数锅炉的容量和参数

机组功率（MW）	500	600	600	800	1000	1000
蒸汽流量（t/h）	1650	1900	1900	2650	2953	3033
过热蒸汽压力（MPa）	25.0	25.4	25.4	25.0	27.56	26.25
过热蒸汽温度（℃）	545	571	545	545	605	605
再热蒸汽流量（t/h）	1481	1607.6	1640.3	2151.5	2457	2469.7
再热蒸汽进口压力（MPa）	4.15	4.71	4.61	3.86	6.0	4.99
再热蒸汽出口压力（MPa）	3.92	4.52	4.42	3.62	5.8	4.79
再热蒸汽进口温度（℃）	295	322	297	283	359	356.3

续表

机组功率 (MW)	500	600	600	800	1000	1000
再热蒸汽出口温度 (℃)	545	569	569	545	603	603
给水温度 (℃)	284	283	277	296	302.4	
燃烧方式	对冲燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	双四角燃烧	对冲燃烧
水冷壁类型	多次上升垂直管屏	螺旋管圈+垂直管屏	螺旋管圈+垂直管屏	多次上升垂直管屏	一次上升垂直管屏	螺旋管圈+垂直管屏
水冷壁管型	光管	内螺旋管	内螺旋管	光管	内螺旋管	内螺旋管

表 1-7 国外超临界参数机组的发展方向

主蒸汽压力 (bar, 1bar=100kPa)	290	305	335	400
主蒸汽温度 (℃)	582	582	610	700
再热蒸汽压力 (bar, 1bar=100kPa)	80	74	93	112
再热蒸汽温度 (℃)	580	600	630	720
循环热效率 (%)	47	49	>50	52~55

二、锅炉的分类

锅炉分类方法很多，主要有以下几种。

1. 按锅炉的用途分类

锅炉按其用途可分为以下几种：

- (1) 电厂锅炉。产生的蒸汽主要用于发电的锅炉。
- (2) 工业锅炉。蒸汽主要用于工业企业生产工艺过程，以及采暖和生活用的锅炉。按照我国标准规定，工业锅炉的最大额定蒸汽压力为 2.45MPa（表压），最大容量为 65t/h。
- (3) 热水锅炉。产生热水供采暖、制冷和生活用的锅炉。

2. 按锅炉容量分类

按锅炉容量的大小，锅炉有大、中、小型之分，但它们之间没有固定、明确的分界。随着我国电力工业的发展，电厂锅炉容量不断增大，大、中、小型锅炉的分界容量便不断变化。从当前情况来看， $D_e>1000t/h$ 的锅炉才算是大型锅炉。

3. 按锅炉的蒸汽压力分类

按照锅炉出口蒸汽压力，可将锅炉分为低压锅炉〔出口蒸汽压力（表压，下同）不大于 2.45MPa〕、中压锅炉（2.94~4.92MPa）、高压锅炉（7.84~10.8MPa）、超高压锅炉（11.8~14.7MPa）、亚临界压力锅炉（15.7~19.6MPa）、超临界压力锅炉（超过临界压力 22.1MPa）和超超临界压力锅炉（一般为 25~40MPa）。

低压锅炉主要用于工业锅炉，装机容量大于或等于 300MW 的发电机组均采用亚临界压力和超临界压力的锅炉。

4. 按锅炉的燃烧方式分类

(1) 层燃炉。固体燃料以一定厚度分布在炉排上进行燃烧的方式称为层燃方式，用层燃方式来组织燃烧的锅炉称为层燃炉。层燃炉具有炉箬（或称炉排），煤块或其他固体燃料主要在炉箬上的燃料层内燃烧。燃烧所需的空气由炉箬下的配风箱送入，穿过燃料层进行燃烧反应。层燃炉多为小容量低参数的工业锅炉，燃烧方式见图 1-4（a）。

(2) 室燃炉。燃料以粉状、雾状或气态随同空气喷入炉膛中，在整个炉内进行燃烧的方式称为火室燃烧方式，用火室燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为室燃炉。其气体动力学特点是：粉状、