

高等学校教材

锅炉原理

东南大学 范从振 主编

中国电力出版社

ISBN 7-80125-579-8



9 787801 255792 >

ISBN 7-80125-579-8/TK · 146

定价: 20.40 元

高等学校教材

锅炉原理

东南大学 范从振 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书着重讲述锅炉的工作原理和计算方法。内容包括：燃料；燃料燃烧计算和锅炉机组热平衡；煤粉制备；燃烧的基本理论和设备；自然循环和强制流动锅炉的汽水系统、受热面布置、工作特性、运行调节和起停方法；锅炉热力计算和水动力计算等。

本书系高等学校电厂热能动力专业的教材，也可供火力发电厂和锅炉制造行业的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉原理/范从振主编. -北京：中国电力出版社，1986
(1998 重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-579-8

I. 锅… II. 范… III. 锅炉-理论-高等学校-教材 IV.
TK221

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 27583 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

三河汇鑫印务有限公司印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1986 年 5 月第一版 2003 年 1 月北京第九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 505 千字

印数53931—56930册 定价：20.40 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)

前 言

本书系根据高等学校热能动力类教材编审委员会的决定，并按锅炉教材编审小组1983年昆明会议通过的教材编写大纲在原《电厂锅炉原理》的基础上进行编写的。

全书共十五章。参加编写的有南京工学院范从振（编写第一、十二、十三、十四、十五章）、周强泰（编写第二、七、九、十、十一章）和西安交通大学的贾鸿祥（编写第三、四、五、六、八章）。

范从振教授担任本书主编，领导全书编写工作。周强泰副教授参加了书稿的统编工作。

本书由华中工学院马毓义教授主审。编者对马毓义教授在审稿中所提宝贵意见表示衷心感谢。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，希读者批评指正。

编 者

1985.2

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 锅炉设备的作用及构成	1
§ 1-2 锅炉分类	2
§ 1-3 锅炉的安全和经济指标	5
§ 1-4 国内外锅炉发展趋势简介	6
第二章 燃料	8
§ 2-1 锅炉用燃料	8
§ 2-2 煤的成分	8
§ 2-3 燃料的某些特性	12
§ 2-4 煤的分类	14
§ 2-5 重油	18
§ 2-6 气体燃料	19
第三章 燃料燃烧计算和锅炉机组热平衡	20
§ 3-1 燃烧所需空气量和过量空气系数	20
§ 3-2 燃烧产物(烟气量)的计算	22
§ 3-3 烟气分析	25
§ 3-4 不完全燃烧方程式(烟气中一氧化碳含量的计算)	26
§ 3-5 锅炉运行状态下过量空气系数的确定	28
§ 3-6 空气和燃烧产物的焓的计算	30
§ 3-7 锅炉机组的热平衡计算	32
§ 3-8 锅炉机组热平衡试验	42
第四章 煤粉制备	43
§ 4-1 煤粉的性质	43
§ 4-2 煤的可磨性系数	46
§ 4-3 磨煤机	48
§ 4-4 制粉系统	59
§ 4-5 制粉系统的其他部件	62
第五章 燃烧过程理论基础	67
§ 5-1 燃烧化学反应动力学基础	67
§ 5-2 燃烧反应的动力区和扩散区	74
§ 5-3 煤和煤粉的燃烧	77
第六章 燃烧设备	82
§ 6-1 煤粉燃烧器及其流体动力学特性	82
§ 6-2 煤粉气流的着火	94
§ 6-3 煤粉炉的点火装置	97
§ 6-4 煤粉炉	100

§ 6-5 层燃炉	111
§ 6-6 沸腾炉	122
第七章 过热器和再热器	125
§ 7-1 过热器和再热器的作用和工作特点	125
§ 7-2 过热器和再热器的型式和结构及其汽温特性	126
§ 7-3 热偏差	134
§ 7-4 运行中影响汽温的因素	139
§ 7-5 蒸汽温度的调节方法	140
§ 7-6 过热器和再热器运行中的若干问题	145
§ 7-7 管子壁温计算	149
第八章 省煤器和空气预热器	151
§ 8-1 尾部受热面概述	151
§ 8-2 省煤器	152
§ 8-3 空气预热器	155
§ 8-4 尾部受热面运行中的若干问题	161
第九章 炉内传热计算	171
§ 9-1 炉内传热的相似理论计算方法	171
§ 9-2 炉膛水冷壁的面积及其他结构特性	176
§ 9-3 受热面的污染系数和热有效系数	177
§ 9-4 系数 M	179
§ 9-5 炉膛黑度	180
§ 9-6 炉内热负荷的分布规律	183
第十章 半辐射和对流受热面的传热计算	186
§ 10-1 对流传热计算的基本公式	186
§ 10-2 传热温压	189
§ 10-3 传热系数	192
§ 10-4 对流受热面的面积和流通截面的面积	211
§ 10-5 对流受热面传热计算方法说明	212
第十一章 锅炉机组的设计和布置	217
§ 11-1 锅炉热力计算的程序和方法	217
§ 11-2 主要设计参数的选择	220
§ 11-3 影响锅炉布置的因素	225
§ 11-4 锅炉的典型布置	230
第十二章 自然循环和蒸发受热面	232
§ 12-1 自然循环的基本概念	232
§ 12-2 汽水混合物的流型和传热	233
§ 12-3 两相流体的基本参数	236
§ 12-4 流体的流动阻力	241
§ 12-5 简单回路的水循环计算	246
§ 12-6 复杂回路的水循环计算	254
§ 12-7 循环安全检查	256

§ 12-8	提高循环安全性的措施	263
第十三章	强制流动锅炉及其水动力特性	267
§ 13-1	直流锅炉	267
§ 13-2	多次强制循环锅炉工作原理	274
§ 13-3	复合循环锅炉	275
§ 13-4	强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性	280
§ 13-5	沸腾传热恶化及其预防措施	294
第十四章	蒸汽净化和锅炉水质工况	297
§ 14-1	蒸汽品质及其污染的原因	297
§ 14-2	饱和蒸汽的机械携带	298
§ 14-3	蒸汽溶盐和选择性携带	302
§ 14-4	汽水分离装置和蒸汽清洗	304
§ 14-5	给水品质和炉水工况	313
第十五章	锅炉运行	320
§ 15-1	锅炉静态特性	320
§ 15-2	汽包锅炉的动态特性和运行调节	324
§ 15-3	汽包锅炉的启动和停用	330
§ 15-4	单元机组中锅炉的变压运行	335
§ 15-5	直流锅炉运行和起停的特点	336
附录	主要符号表	346

第一章 绪 论

§ 1-1 锅炉设备的作用及构成

在日常生活、工业生产或热力发电厂中，经常利用蒸汽供应热量或产生动力。通常蒸汽是通过蒸汽锅炉产生出来的。燃料在锅炉中燃烧放出热能，并将热能传给水，藉以产生出一定压力和温度的蒸汽。在热力发电厂中锅炉所产生的蒸汽被引入汽轮机，带动发电机发电。

目前我国电厂锅炉所用燃料主要是煤，一般先把煤磨制成煤粉，然后送入炉膛燃烧。图 1-1 示出一台煤粉锅炉的主要设备。由煤仓落下的煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 磨制成煤粉。煤在磨制过程中要用热空气干燥。送风机 14 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 5，冷空气在此被烟气加热。热空气的一部分经排粉机 13 送入磨煤机，将煤加热和干燥，同时它本身也是输送煤粉的介质。从磨煤机排出的气粉混合物经燃烧器 8 进入炉膛燃烧。由空气预热器来的另一部分热空气直接进入燃烧器参与燃烧反应。

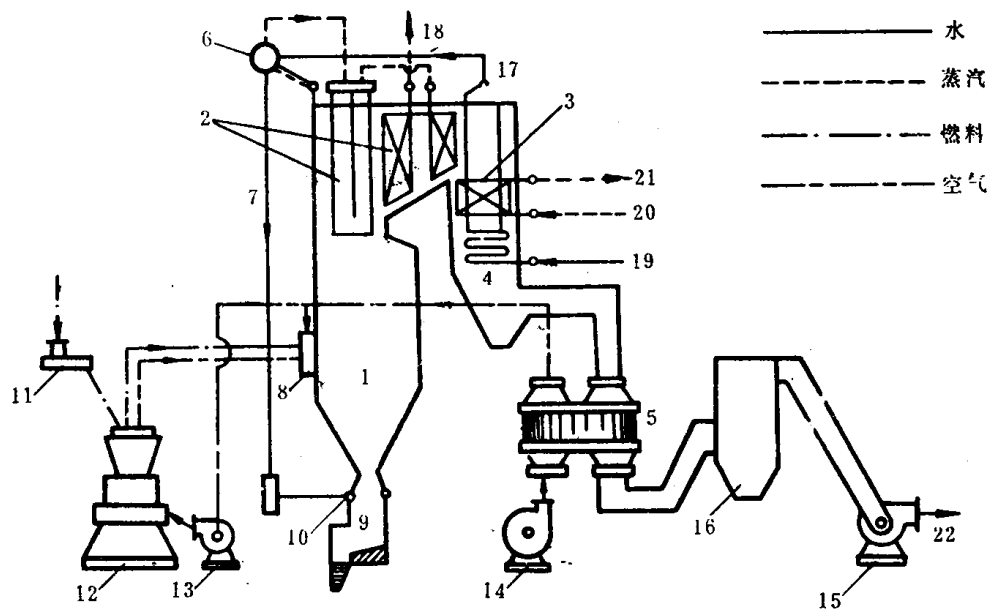


图 1-1 煤粉锅炉及辅助设备示意图
1—炉膛水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；7—下降管；8—燃烧器；
9—排渣装置；10—联箱；11—给煤机；12—磨煤机；13—排粉机；14—送风机；15—引风机；16—除尘器；17—
省煤器出口联箱；18—过热蒸汽；19—给水；20—进口再热蒸汽；21—出口再热蒸汽；22—排烟

锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内悬浮燃烧，炉膛周围墙壁上布置有密集排列的水冷壁管，管内有水和蒸汽流过，既能吸收炉膛的辐射热，又能保护炉墙不致被烧坏。燃烧火焰中心具有 1500°C 或更高的温度，但在上部炉膛出口处，烟气温度要低于煤灰的熔点，以免熔化的灰渣粘结在烟道内的受热面上。煤粉燃烧所生成的较大灰粒沉降于炉膛底部的冷灰斗中，逐渐冷却和凝固，并落入排渣装置 9，形成固态排渣。大量较细的灰

粒随烟气离开炉膛，流经一系列对流受热面，逐渐冷却，最后由引风机15经烟囱排入高空。排烟的温度通常在150℃左右。为了减少排烟所带出的飞灰，防止环境污染，离开锅炉的烟气先流经除尘器16，使绝大部分飞灰被捕捉下来。最后只有少量细微灰粒排入大气。

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。加热给水的受热面叫做省煤器；使饱和水转变成饱和蒸汽的受热面叫做蒸发受热面；把饱和蒸汽加热为过热蒸汽的受热面叫做过热器。为了提高锅炉——汽轮机组的循环热效率，对高压机组大多要采用蒸汽再热。这样在锅炉中还有再热器，或称二次过热器。

当送入锅炉的给水含有杂质时，其杂质浓度随着锅炉水的汽化要升高，严重时甚至在受热面上结成水垢使传热恶化。因此对给水要预先进行处理。由锅炉送出的蒸汽可能因带有锅炉水而被污染(水中含有杂质)。高压时蒸汽还能直接溶解一些杂质。蒸汽进入汽轮机后，所含杂质会部分沉积在汽轮机的通流部分，影响汽机的出力、效率和工作安全。这样我们不仅要求锅炉能供给一定压力和温度的蒸汽，还要求它具有一定的净度。

§ 1-2 锅 炉 分 类

一、锅炉容量和参数

锅炉的容量或额定蒸发量是指锅炉的最大长期连续蒸发量，常以每小时所能供应蒸汽的吨数来表示；锅炉的工作参数是指锅炉送出蒸汽的压力和温度，锅炉设计时所规定的蒸汽压力和温度称为额定蒸汽压力和额定蒸汽温度。对于具有再热器的锅炉，蒸汽参数中还应包括再热蒸汽流量、压力和温度。

按照蒸发量的大小，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小型了。按蒸汽压力的高低，锅炉可分为低压、中压、高压、超高压、亚临界压力和超临界压力等类型。

新中国诞生以来，我国逐步建立和发展了自己的锅炉制造业，生产了各种类型的锅炉。表 1-1 列出了主要国产锅炉的某些容量和参数，目前我国已生产出的最大容量的锅炉

表 1-1 国产动力用锅炉的容量和参数

压 力 类 别	蒸汽压力 [MPa]	蒸汽温度 [℃]	给水温度 [℃]	额定蒸发量 [t/h]	配套机组容量 [MW]
中 压	3.8 (39)	450	150, 172	35	6
				65, 75	12
				120, 130	25
高 压	9.8(100)	510, 540	215	220, 230	50
		540		410	100
超 高 压	13.7 (140)	555/555	240	400	125
				670	200
亚 临 界 压 力	16.7 (170)	570/570	260	935	300
		555/555		1000	

注 1. 蒸汽压力的兆帕数均为约数，括号中的数值为表大气压 (at)，是准确值；
2. 以分数形式表示的蒸汽温度，分子为过热汽温，分母为再热汽温。

为亚临界压力的1000 t/h 直流锅炉。在世界上已生产出的最大容量的锅炉为配1300MW 汽轮发电机的超临界压力的4300 t/h 锅炉。

二、按燃烧方式分类

从不同的观点来看，锅炉有不同分类方式。锅炉所用燃料是多种多样的，有煤、油、气体以及其它可燃物。在我国，由于煤炭资源丰富，而且分布地区广，所以常以煤为主要燃料。对于不同燃料要采用不同的燃烧方式，因此锅炉的结构也就不一样了。下边就不同燃烧方式介绍几种锅炉类型：

1. 层燃炉

层燃炉具有炉算(或称炉排)，煤块或其它固体燃料主要在炉算上的燃料层内燃烧。燃烧所需空气由炉算下送入，穿过燃料层进行燃烧反应。部分未燃尽的可燃气和被气流吹起的细粒燃料，仍可在燃料层上的炉膛空间中继续燃烧。这类锅炉多为小容量、低参数的工业用锅炉。

2. 室燃炉

燃料在室燃炉中主要是在炉膛空间悬浮燃烧。液体燃料炉、气体燃料炉以及前节所介绍的煤粉炉均属于室燃炉。这是电厂锅炉的主要燃烧方式。在燃烧煤粉的室燃炉中由于排渣方式不同，又可分为固态排渣煤粉炉(图1-1)和液态排渣煤粉炉。

3. 旋风炉

旋风炉是一个以圆柱形旋风筒作为主要燃烧室的炉子，气流在筒内高速旋转，煤粉气流沿圆筒切向送入或由筒的一端旋转送入。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。筒内的高温 and 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，可燃用粗煤粉或煤屑。根据锅炉容量大小，一台锅炉可带有一个或数个旋风筒。

4. 火炬—层燃炉

用空气或机械播撒把煤块和煤粒抛入炉膛空间，然后落到炉算上的燃烧方式称为火炬—层燃。实际上有些细煤屑在炉膛空间完全燃尽，较大颗粒可能在空间内着火后再落到煤层上继续燃烧，最大的煤块则在落到煤层上以后才开始着火燃烧。这种炉子往往配以链条炉算，并用于容量不大的锅炉。

5. 沸腾炉

沸腾炉也称流态化燃烧炉，这是一项正在发展中的新技术。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混合，燃烧着火快，效率高，床层内安置有以水和蒸汽(或空气)为冷却介质的埋管，使床层温度控制在700~1000℃之间。沸腾炉可在常压下工作，并正在研究用于增压下工作。由增压沸腾炉出来的高温高压燃气，经除尘后可送入燃气轮机，而由埋管出来的蒸汽则送入蒸汽轮机，这样就形成所谓燃气—蒸汽联合循环。

三、按水的循环方式分类

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，

一侧由烟气侧吸收热量，另一侧把热量传给给水或蒸汽。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，所以内部工质应不断流动。水在省煤器中和蒸汽在过热器中均为单相工质，只是一次通过受热面。给水流经省煤器的阻力要由给水泵的压头来克服，故省煤器进口的压力高于蒸发面中的压力。过热器中蒸汽的流动阻力是由压力降来克服的，即在过热器进口和出口之间也有压力差。

流经蒸发受热面的工质为水和汽的混合物。汽水混合物可能一次或多次流经蒸发受热面，对于结构不同的锅炉，推动汽水混合物流动的方式也不一样，按此可把锅炉分为几种类型：自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉。图 1-2 示出不同类型锅炉的示意图。

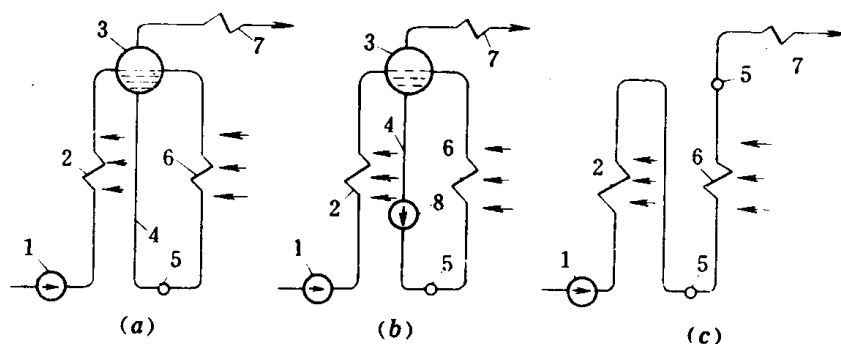


图 1-2 蒸汽锅炉蒸发部分的几种类型

(a) 自然循环；(b) 多次强制循环；(c) 直流式

1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—联箱；6—蒸发管；7—过热器；8—强制循环泵

自然循环锅炉(图 1-2, a)。给水经给水泵 1 流入省煤器 2，受热后进入蒸发系统。蒸发系统包括不受热的下降管 4、受热的蒸发管 6、联箱 5 和汽包 3。当水在蒸发管中受热时，部分水转变为蒸汽，故蒸发管中为汽和水的混合物，而在不受热的下降管中则全部为水。水的密度要大于汽水混合物的密度，故在联箱 5 两侧有不平衡的压力差，借以推动水和汽水混合物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。汽水混合物进入汽包后，汽和水分离，汽包的上半部为蒸汽而下半部为水。分离出的蒸汽流经过热器 7 送出，分离出的水同由省煤器来的给水混合，流入下降管往复循环。每公斤水每循环一次只有一部分转变为汽，或者说每公斤水要循环几次才能完全汽化。这种循环流动是由于蒸发管的受热而形成，故称为自然循环。循环水量要大于生成的蒸汽量，单位时间内的循环水量同生成汽量之比称为循环倍率。自然循环锅炉的循环倍率约为 4 ~ 30。

多次强制循环锅炉(图 1-2, b)。如果在循环回路中加装循环水泵，就可增强工质的流动推动力。这种循环方式称为多次强制循环。在多次强制循环锅炉的循环回路中，循环流动压头要比自然循环时增强很多，故可更自由地布置蒸发管。在自然循环锅炉中为了维持受热蒸发管中工质的良好流动，常使蒸发管为垂直或近于垂直的布置，并使汽水混合物由下向上流动；但在多次强制循环锅炉中，蒸发管既可垂直也可水平布置，其中的汽水混合物既可向上也可向下流动。因而可更好地适应锅炉结构的要求。多次强制循环锅炉的循环倍率约为 3 ~ 10。

自然循环锅炉和多次强制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将省煤器、蒸发部分

和过热器分隔开，并使蒸发部分形成密闭的循环回路。汽包内的大容积能保证汽和水的良好分离。但是汽包锅炉只适用于临界压力以下的工作压力。

直流锅炉（图 1-2，c）。直流锅炉没有汽包，工质一次通过蒸发部分，即循环倍率等于一。直流锅炉的另一特点是：在省煤器、蒸发部分和过热器之间没有固定不变的分界点，水在受热蒸发面中全部转变为蒸汽，沿工质整个行程的流动阻力均由给水泵来克服。直流锅炉既可用于临界压力以下也可设计为超临界压力。

复合循环锅炉。在自然循环和多次强制循环锅炉中，水要多次流经蒸发部分才能完全转变为蒸汽；在直流锅炉中，水只一次通过蒸发部分就全部汽化。所谓复合循环锅炉是在一台锅炉上具有这两种循环方式的锅炉。图 1-3 示出复合循环锅炉的两个循环系统举例。图 1-3 (a) 为亚临界压力低负荷再循环系统，锅炉在低负荷时由蒸发部分流入分离器的为湿蒸汽，经分离后蒸汽流入过热器，而水则由循环泵送回到省煤器进口，这时流经蒸发部分的工质流量超过流出的蒸汽量，即循环倍率大于 1。高负荷时由蒸发部分出来的是微过热蒸汽，这时循环泵停用，锅炉按纯直流方式工作。图 1-3 (b) 示出超临界压力下的复合循环系统，它不用汽水分离器，只是在低负荷时开启调节阀 12 使较多的工质流经蒸发部分；但在高负荷时关闭调节阀，锅炉按纯直流方式工作。不论在低负荷或高负荷时再循环泵均在工作。

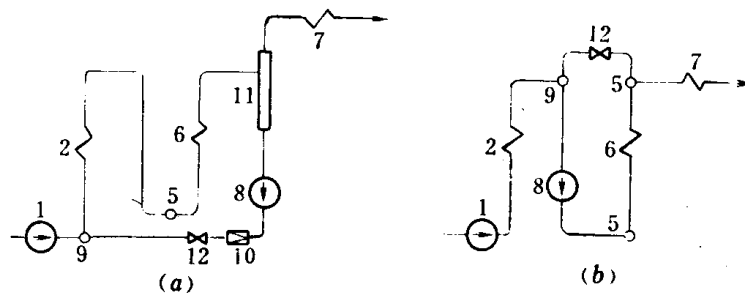


图 1-3 复合循环系统
1 ~ 8—同图 1-2；9—混合器；10—止回阀；11—汽水分离器；12—调节阀

§ 1-3 锅炉的安全和经济指标

在工业生产中，尤其在火力发电厂中，锅炉是重要设备之一，它的安全性和经济性对生产十分重要。同时锅炉本身是高温高压的大型设备，一旦发生爆炸或破裂事故，将是十分危险的。锅炉的安全性常用下述几种指标来衡量：

(1) 连续运行小时数 = 两次检修之间运行的小时数；

(2) 事故率 = $\frac{\text{事故停用小时数}}{\text{总运行小时数} + \text{事故停用小时数}} \times 100\%$ ；

(3) 可用率 = $\frac{\text{运行总时数} + \text{备用总时数}}{\text{统计期间总时数}} \times 100\%$ 。

所谓事故率和可用率可按一适当长的周期来计算。我国发电厂锅炉在正常情况下每年安排一次大修和几次小修，在统计时通常以一年为一个周期。目前国内较先进的指标为：事故率约为1%，可用率约为90%，连续运行小时数在4000以上。

锅炉的经济性可用锅炉的总效率和锅炉的投资来说明。锅炉在运行中要耗用一定的燃料，每公斤燃料具有一定的热值。但是所耗用的热量未能完全被利用，有些燃料未能完全燃烧，排出的烟气也带走热量等等。所谓锅炉热效率，其定义为：锅炉每小时的有效利用热量（即水和蒸汽所吸收的热量）占耗用燃料全部发热量的百分数。现在电厂用锅炉的热效率都在90%以上。

锅炉本身的投资在很大程度上取决于制造时的钢材使用率，所谓钢材使用率是指锅炉每小时产生一吨蒸汽所用钢材的吨数。锅炉的容量越小，蒸汽参数越高，则钢材的使用率越大。所用钢材主要是低碳钢，但参数较高的锅炉要用部分耐高温的合金钢，其价格要比碳钢贵很多。此外还要耗用一些耐火材料、绝热材料以及制造、运输和安装等费用。

锅炉结构的紧凑性对厂房建筑费用影响很大，其它辅助设备的投资也应考虑。另外，燃料性质对锅炉的投资影响也很大，在这方面气体燃料最有利，其次为油，而煤最差，劣质煤要比优质煤更差些。直流锅炉所用钢材可能只有同容量、同参数自然循环锅炉的70%左右。一般说来，电厂用各种锅炉的钢材使用率约在2.5~5 t/(t/h)范围内。

§ 1-4 国内外锅炉发展趋势简介

随着生产的发展蒸汽锅炉在工业生产或热力发电厂中的使用越来越多，在国民经济中的地位也更为重要，因此如何提高锅炉的安全性、经济性，降低其造价，增长其使用寿命，减少其对环境的污染等等，已成为锅炉发展和研究的重大问题。

就全国来说工业锅炉为数很多，总数近20万台，每年的燃料耗量将近两亿吨，约占全国总煤耗的三分之一。工业工厂的锅炉要配合工业生产需要，一般容量较小，蒸汽参数也不高，并常用快装式或组装式，多属部分机械化操作。由于设备和历史原因，工业锅炉所燃用的燃料多是比较好的煤，但其热效率不高，而且污染比较严重。今后的发展趋势可能有下述几个方面：

(1) 在近期内把不安全和效率过低的老、旧锅炉更新，并使其能更好地适应工业生产的要求（如负荷变动，工业生产与生活取暖的配合）。

(2) 燃用质量较差的煤，包括燃用地区性劣质煤（如用沸腾炉烧多灰低热值煤）。

(3) 减少人工操作，加强机械化和自动化。

(4) 尽可能满足环境保护的要求。

在火力发电厂中，锅炉是主要生产设备之一，它随着电力事业的发展而不断发展，其发展趋势大体上可按下述几方面来说明：

1. 锅炉容量

世界工业先进国家为了适应电力需要的增长，多尽快扩大发电机组的单机容量。机组容量增大则每千瓦的设备费用降低，金属耗量减小，基建投资节省。在其它条件相同时，

锅炉容量增大一倍，每 t /h 的金属用量减少 5 ~ 20%，所需管理人员也减少。各国情况不同，机组容量增大的速度也不完全一样，但总的趋势是相同的。从美国最近 20 ~ 40 年的情况来看，单机组容量大约每 10 年增大一倍。美国在 40 年代开始用容量为 100MW 的机组，50 年代发展为 200 ~ 300MW；60 年代开始发展 500MW 机组；70 年代开始生产一台 1150MW 机组，相应的锅炉蒸发量为 3638 t /h。

英国在采用大机组方面虽然比较保守些，但也并不例外，从 50 年代至 70 年代，发电机组的容量由 100 ~ 250MW 提高到 500 ~ 660MW，并正向 800 ~ 1000MW 方向发展。

在我国由于解放前的电力事业基础薄弱，发展较为缓慢，但向增大单机容量方向的发展趋势也是明显的，50 年代的主力机组容量为 50MW，60 年代为 100MW，70 年代大量装设了 200 ~ 300MW 的机组。最近已开始生产 600MW 机组。

机组容量的增大也有其限制因素，燃料的影响就是其中之一。一般说来，燃气或燃油锅炉，其安全性要比燃煤锅炉高些。燃用劣质煤时更影响到锅炉的可用率。60 年代机组容量迅速增大，对锅炉可用率产生了不利影响。电力负荷是经常变动的，为适应这种变动，锅炉机组应有更大的运行灵活性，但是机组容量越大，适应负荷变动的能力越差。

2. 蒸汽参数

随机组容量的增大，提高电厂的热效率就变得更为迫切，提高蒸汽参数和采用蒸汽再热是提高电厂热效率的有效措施。

表 1-1 给出国产电厂机组所用的蒸汽参数，在国外有的还采用超临界（25 ~ 27MPa）压力，由超高压提高到亚临界压力，大约可使电厂经济性提高 1.7%。在国外对于 900 ~ 1000MW 及以上的机组，如将蒸汽参数由亚临界压力提高到超临界压力，电厂经济性又可提高 1.8% 左右。

根据技术经济比较，由于超临界压力机组的设备费用较高，对 300 ~ 600MW 机组，总经济性的提高不明显，故多采用亚临界参数，机组容量达 900 ~ 1000MW 以上时，采用超临界压力对机组及蒸汽管道的经济性都有些好处。在超临界压力下蒸汽的比容减小，蒸汽管道的直径可以减小，管壁就可减薄。蒸汽比容的减小又可使汽机的尺寸缩小，对大功率汽轮机这是有利的。在超临界压力范围内，如汽温不变而继续提高压力，则需采用两次再热，这将使系统复杂并使设备费用增加。

目前大容量机组所用蒸汽温度由 540℃ 到 570℃ 不等，提高汽温可有效地提高电厂热效率，但由于昂贵高合金钢材的使用，使设备的造价大为提高。在 60 年代美国曾采用汽温为 640℃ 的超临界压力机组，但因高温腐蚀和泄漏等困难，以后不再采用，目前蒸汽温度有保持在 540℃ 的趋向。

近年来，超高压以上的机组多采用一次或二次蒸汽再热，采用一次再热，约可提高循环效率 4 ~ 5%；如采用二次再热，其所得经济效果将比第一次再热低些。采用蒸汽再热时，管道系统和机组运行均较复杂；蒸汽压力降低时，比容增大，困难也就更大。因此，大机组目前一般采用一次再热，再热汽温一般与新汽温度相同。为了简化管道系统，对有再热的机组都采用一机一炉的单元组合，单元组合的造价要比母管制系统低得多。但是在单元制系统中，对锅炉运行的安全性和可用率要求更高，因为锅炉的事故将迫使汽机停止工作。

第二章 燃 料

§ 2-1 锅 炉 用 燃 料

燃料是指在燃烧过程中能够产生热量的物质。电厂锅炉是耗用大量燃料的动力设备，燃料的性质对锅炉工作的安全性和经济性有重大的影响。对于不同的燃料，要采用不同的燃烧方式和燃烧设备。因此，对于锅炉设计和运行人员来说，了解燃料的性质和特点是很重要的。

燃料，按它的状态可分为三类，即：固体、液体和气体。煤是我国电厂锅炉的主要燃料。某些优质煤往往具有其它工业生产所需的某些特性，如果作为动力燃料，只利用其热量，就未能物尽其用。因此，对锅炉来说，应尽量燃用对其它工业没有更大经济价值的燃料。

原油和天然气是宝贵的化工原料，不宜作为锅炉用燃料。目前，只有极少数电厂用石油炼制后的残余物——重油或油渣作为锅炉燃料。高炉煤气是炼铁炉的副产品，可用于钢铁厂或邻近的锅炉作为燃料。焦炉煤气有时也作为锅炉的燃料。然而燃烧这些煤气的锅炉毕竟为数很少，本章介绍的燃料将以煤为主。

§ 2-2 煤 的 成 分

一、元素分析和工业分析

煤是包括有机成分和无机成分等物质的混合物，其分子结构十分复杂。为了实用方便，都通过元素分析和工业分析来确定各种物质的百分含量。

煤中的元素组成，一般是指有机物中的碳(C)、氢(H)、氮(N)、氧(O)、硫(S)的含量而言。根据现有的分析方法，尚不能直接测定煤中有机物的化合物，因为其中大多数的化合物在进行分析时会逐渐分解。因此，一般是用测定煤的元素组成，即确定上述元素含量的质量百分比，作为煤的有机物的特性。

煤的有机物的元素组成，并不能表明煤中所含的是何种化合物，也不能充分地确定煤的性质。但是，元素组成与其它特性相结合，可以帮助我们判断煤的化学性质。元素组成的变化往往代表着煤化程度的差别。随着煤化程度提高，碳含量逐渐增加，氧含量则逐渐减少。氢的含量也随煤化程度的增加而稍微下降。煤的元素组成是燃烧计算的依据。此外，煤的技术分类也与元素组成有一定关系。

煤中元素组成的测定(元素分析)，大多数借助燃烧，并设法测定燃烧生成物中该元素的含量，或加入某种化合物使被测成分转化为易于测定的物质等。元素分析是相当繁杂的。一般电厂只作工业分析，即按规定的条件将煤样进行干燥、加热或燃烧，以测定煤中的水

分、挥发分和灰分。通过工业分析，能了解煤在燃烧时的某些特性。

二、煤的成分

为了进行燃料的燃烧计算和了解煤的某些特性，常将燃料的成分分为：碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、水分(W)和灰分(A) (图2-1)，其含量以质量百分数表示。各种成分的特点如下。

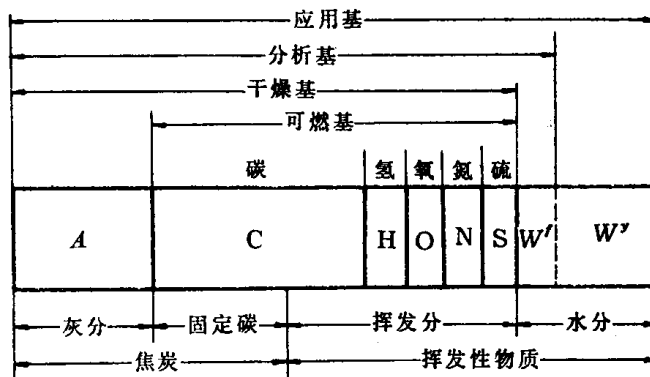


图 2-1 煤的成分及其与各种成分基准之间的关系

1. 碳

碳是煤中含量最多的可燃元素。地质年代长的无烟煤，其含碳量可高达90% (按可燃基成分)；而年代浅的煤则只有50%左右。每公斤碳完全燃烧时可放出约 32700 kJ (7800kcal) 的热量。碳是煤的发热量的主要来源。煤中一部分碳与氢、氮、硫等结合成挥发性有机化合物，其余部分则呈单质状态，称为固定碳。固定碳要在较高的温度下才能着火燃烧。煤中固定碳的含量愈高，就愈难燃烧。

2. 氢

煤中氢的含量大多在 3 ~ 6 % 的范围内。煤中的氢，一部分与氧结合成稳定的化合物，不能燃烧；另一部分则存在于有机物中，在加热时挥发出氢气或各种碳氢化合物(C_mH_n)。这些挥发性气体较易着火和燃烧。氢的发热量很高。每公斤氢燃烧可放出约 120×10^3 kJ (28600kcal) 的热量 (当燃烧产物为水蒸汽时)。

3. 氧和氮

氧和氮是有机物中的不可燃成分。燃料中的氧，一部分与氢或碳结合成化合状态。氧在各种煤中的含量差别很大。年代浅的煤含氧量较高，最高的可达40%左右。随着煤化程度提高，氧的含量逐渐减少。煤中氮的含量一般不多，只有0.5~2.0%。氮在燃烧时会或多或少地转化为氧化氮(NO_x)，造成大气污染。

4. 硫

煤中的硫以三种形态存在：有机硫(与C、H、O等结合成复杂的化合物)、黄铁矿硫(FeS_2)和硫酸盐硫($CaSO_4$ 、 $MgSO_4$ 、 $FeSO_4$ 等)。硫酸盐一般不再氧化，表现为灰分。可燃硫只包括前面两种形态。每公斤硫完全燃烧时可放出热量9040kJ (2160kcal)。

5. 水分

将煤样在102~105℃条件下干燥到恒重，失去的重量就是水分(全水分)。各种煤的水