

锅炉设备及运行

西安电力学校主编

电力工业出版社

锅炉设备及运行

西安电力学校主编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24.75印张 563千字 1插页

1981年7月第一版 1981年7月北京第一次印刷

印数 00001—30140册 定价 2.10元

书号 15036·4199

内 容 简 介

本书内容包括：燃料及制粉系统；燃烧基本原理和燃烧设备；自然循环锅炉和强制循环锅炉的循环原理和汽水系统；锅炉各受热面的布置和工作特性；锅炉的运行调节和起停；锅炉的热力计算、通风计算和强度计算。

本书是中等专业学校电厂热能动力设备专业的教材，也可供电厂工作人员自学、参考。

前 言

本书是中等专业学校电厂热能动力设备专业教材。

全书共十五章，主要阐述发电厂锅炉的结构、工作原理、计算方法和运行的一般规律。

本书编者为：西安电力学校李恩辰（绪论，第二、三、十二、十三、十四章）、林应师（第十、十一章、第五章中液态排渣炉的高温腐蚀与炉底析铁部分、第八章第七节、第九章第四节、第十五章第七节）；长春电力学校姜信、张嘉林（第一、四、五章）；重庆电力学校万承勋（第六、七章）；哈尔滨电力学校吴惠琛（第八、九章）；山东电力学校孙启光（第十五章）。西安电力学校李恩辰、林应师为主编。

本书审稿人为：北京电力学校刘玉铭；湖北省电力学校徐贤曼；沈阳电力学校谷兴。北京电力学校刘玉铭为主审。

编者中，孙启光同志已调到上海电力专科学校工作，上海电力专科学校对本书编写工作给予很大支持，特此致谢。

由于水平有限，书中缺点、错误，希读者指正。

编 者

1980年10月

目 录

前 言

绪 论	1
第一节 电站锅炉的作用	1
第二节 电站锅炉的构成和工作过程	1
第三节 电站锅炉的特点	2
第四节 锅炉设备的基本特性	3
第五节 锅炉的分类和型号	3
第六节 国内外电站锅炉发展概况	4
第一章 燃料	5
第一节 概述	5
第二节 煤	5
第三节 燃料油	14
第四节 气体燃料	16
第二章 燃料燃烧计算	19
第一节 燃烧的化学反应	19
第二节 燃料燃烧时的空气需要量	20
第三节 烟气组成及烟气量的计算	21
第四节 完全燃烧方程式	26
第五节 根据烟气成分计算过量空气系数	29
第六节 烟气焓的计算	31
第三章 锅炉机组热平衡	35
第一节 热平衡方程	35
第二节 锅炉的输入热量	36
第三节 机械不完全燃烧热损失	37
第四节 化学不完全燃烧热损失	39
第五节 排烟热损失	40
第六节 散热损失	41
第七节 灰渣物理热损失	42
第八节 锅炉有效利用热、热效率及燃料消耗量	43
第四章 制粉系统	45
第一节 煤粉的性质和品质	45
第二节 磨煤机	48
第三节 制粉系统	58
第四节 制粉系统的主要部件	61

第五节 制粉系统的出力	68
第五章 燃料燃烧原理及燃烧设备	76
第一节 燃料燃烧的基本原理	76
第二节 典型燃烧方式	84
第三节 煤粉炉的燃烧设备	88
第四节 油的燃烧及燃烧设备	111
第六章 锅炉蒸发设备及自然水循环原理	123
第一节 锅炉蒸发设备	123
第二节 自然水循环原理	131
第三节 自然水循环的故障及安全性检查	141
第四节 自然循环回路的合理布置和运行	149
第七章 蒸汽的净化	154
第一节 对蒸汽品质的要求	154
第二节 蒸汽中杂质的来源	155
第三节 提高蒸汽品质的途径	160
第四节 汽包内部装置示例	170
第八章 过热器和再热器	173
第一节 概述	173
第二节 过热器的结构与特性	174
第三节 过热器的热偏差及其防止	179
第四节 再热器的工作特性及结构特点	183
第五节 蒸汽温度的调节方法	184
第六节 典型过热器再热器系统举例	193
第七节 对流受热面烟气侧的高温腐蚀及积灰	193
第九章 省煤器和空气预热器	198
第一节 省煤器	198
第二节 空气预热器	201
第三节 尾部受热面的布置	209
第四节 尾部受热面的磨损与腐蚀	210
第十章 强制循环锅炉的基本结构与工作原理	217
第一节 强制循环锅炉概述	217
第二节 直流锅炉	217
第三节 辅助循环锅炉	231
第十一章 锅炉整体布置及典型锅炉简介	235
第一节 锅炉整体布置	235
第二节 典型锅炉简介	239
第十二章 锅炉受热面的传热计算	253
第一节 锅炉炉膛的热力计算	253
第二节 锅炉对流受热面热力计算的基本原理和方法	268
第三节 屏式过热器热力计算	286

第四节	凝渣管热力计算特点	289
第五节	对流过热器热力计算特点	290
第六节	省煤器热力计算特点	291
第七节	空气预热器热力计算特点	292
第八节	附加受热面计算	294
第九节	锅炉热力计算误差检查	294
第十三章	锅炉通风阻力计算	296
第一节	通风阻力的一般计算	296
第二节	锅炉烟道阻力计算	303
第三节	锅炉风道阻力计算	311
第四节	风机选择及烟囱高度的确定	313
第十四章	锅炉主要承压部件的强度计算要点	316
第一节	许用应力的选择	316
第二节	计算壁温的确定	317
第三节	汽包筒体的强度计算	317
第四节	圆形联箱、管子和凸形封头的强度计算	324
第五节	孔的加强计算概念	327
第十五章	锅炉运行	332
第一节	锅炉的启动和停运	332
第二节	锅炉运行的参数调节	344
第三节	锅炉的燃烧调整	355
第四节	制粉系统的运行	361
第五节	锅炉在非设计工况下的运行	365
第六节	锅炉事故	371
第七节	直流锅炉的运行特点	378

绪 论

第一节 电站锅炉的作用

随着我国四个现代化建设事业的深入发展，能源，特别是电力在国民经济各个方面的决定性作用将更加突出。

一般，电是在发电厂中生产的。当前世界上的发电厂有三大类：火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。火力发电厂目前在世界大多数国家和我国都是电能生产的主力。

火力发电厂的生产过程可简要地用图 0-1 来表示。在锅炉 1 中燃料燃烧放出热能将水加热成具有一定压力和温度的蒸汽，然后蒸汽沿管道进入汽轮机 2 膨胀作功，带动发电机 3 一起高速旋转，从而发出电来。在汽轮机中作完功的蒸汽排入凝汽器 4 并凝结成水，又被凝结水泵 5 送入除氧器 7，水在除氧器中被来自抽汽管 6 的汽轮机抽汽加热并除去所含的气体，最后又被给水泵 8 送回锅炉 1 再重复参加上述循环过程。

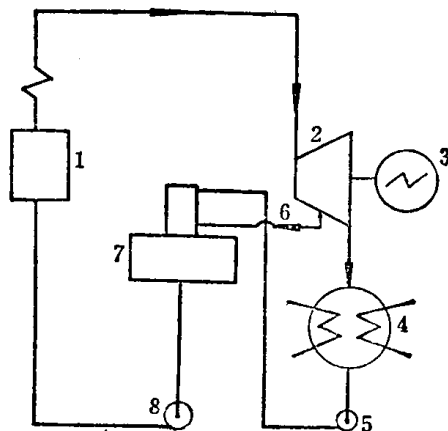


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图
1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；
5—凝结水泵；6—抽汽管；7—除氧器；8—给水泵

显然，在火力发电厂中存在着三种型的能量转换过程：在锅炉中燃料的化学能转换成热能；在汽轮机中热能转换成机械能；在发电机中机械能转换成电能。进行能量转换的主要设备——锅炉、汽轮机和发电机，被称为火力发电厂的三大主机。而锅炉则是三大主机中最基本的能量转换设备。

第二节 电站锅炉的构成和工作过程

锅炉设备一般是由锅炉本体和锅炉辅助设备组成的。锅炉本体主要包括喷燃器、燃烧室（炉膛）、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。

发电用锅炉称为电站锅炉。燃用煤粉的电站锅炉可用图 0-2 简要地说明其组成和工作过程。

煤由煤斗 1 落下，通过给煤机 2 送入磨煤机 3 被磨制成煤粉，然后和风一起通过排粉机 4 经过喷燃器 5 被吹入炉膛 22 燃烧放热。高温的火焰和烟气在炉膛内上行右转再下行，依次经过屏式过热器 7、对流过热器 8、再热器 9、省煤器 10、空气预热器 13，经除尘器 15 除过飞灰后被引风机 16 送入烟囱 17 并排入大气。燃料燃烧需要的空气经风道 11 吸入送风

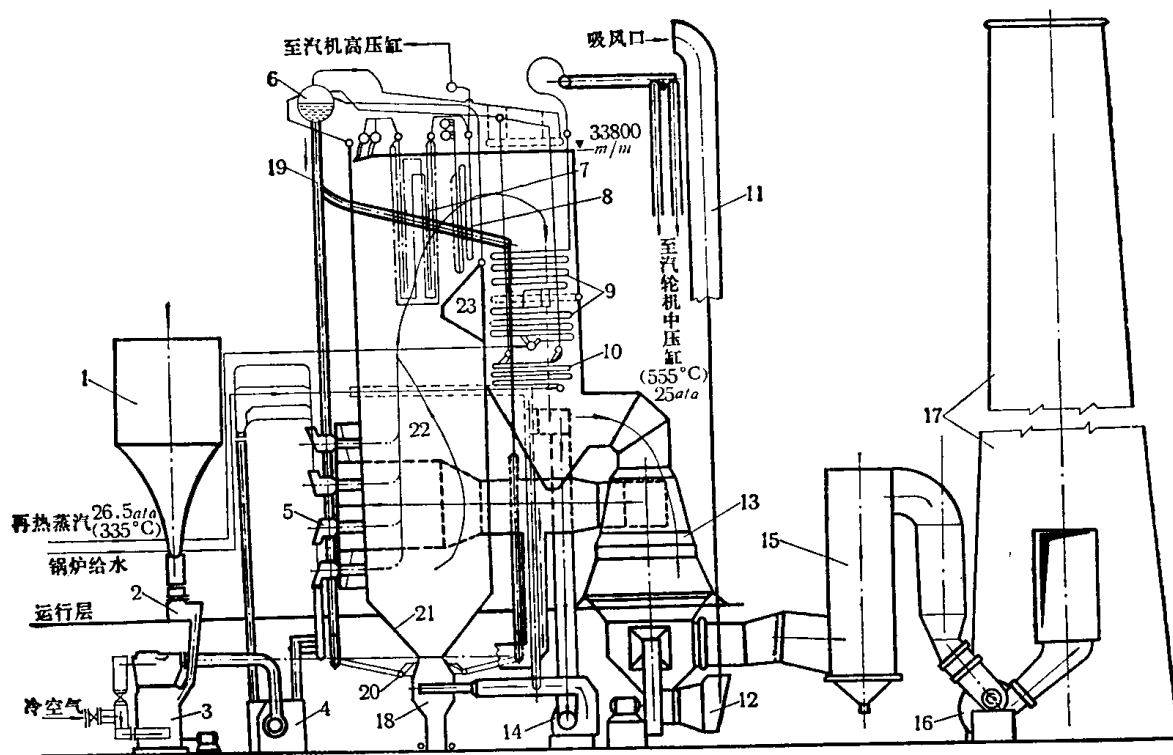


图 0-2 SG-400/140-555/555-1型超高压锅炉

1—煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—排粉机；5—喷燃器；6—汽包；7—屏式过热器；8—对流过热器；9—再热器；10—省煤器；11—送风机进风道；12—送风机；13—空气预热器；14—烟气再循环风机；15—除尘器；16—引风机；17—烟囱；18—灰渣斗；19—下降管；20—下联箱；21—炉墙及水冷壁；22—燃烧室(炉膛)；23—折焰角

机12，升压后通过空气预热器加热，再经喷燃器送入炉膛。上述设备和系统构成锅炉燃烧系统。燃烧系统的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：由给水泵（图中未示出）来的水经省煤器10加热后进入汽包6，然后经下降管19、下联箱20进入水冷壁21，吸热汽化后又回到汽包。在汽包中分离出的汽沿蒸汽管进入屏式和对流过热器，被加热成过热蒸汽后送入汽轮机做功。在汽轮机高压缸作过功的蒸汽又被送回锅炉的再热器9，在受热升温提高工作能力后再次被送到汽轮机中压缸继续作功。上述锅炉汽水系统的主要任务是尽可能有效的吸热。

第三节 电站锅炉的特点

电站锅炉与其他工厂用的工业锅炉相比有一些明显的特点，仅就我国目前情况可作简要比较如下：

(1) 电站锅炉的容量较大 工业锅炉每小时的蒸发量一般仅4~20吨/时，35吨/时以上的就少了。电站锅炉的蒸发量则较大，一般多在220~670吨/时之间，1000吨/时以上的也已为数不少。

(2) 电站锅炉的蒸汽参数(压力和温度)较高 工业锅炉的蒸汽压力多在25公斤/厘米²以下，蒸汽温度多在400℃以下。电站锅炉蒸汽压力多在100~170公斤/厘米²之间，

蒸汽温度最少也有450℃，一般都在540℃以上。

(3) 电站锅炉的自动化程度高 电站锅炉的各项操作早已实现了高度的机械化和自动化,适应负荷变化的能力很强。工业锅炉目前仅处于半机械化向全机械化发展的过程中。

(4) 电站锅炉的热效率较高 工业锅炉的热效率多在60~80%之间,电站锅炉热效率多在90%以上。

总之,电站锅炉是蒸发量大、结构复杂、自动化程度很高的设备。要掌握好这样的设备,必须对锅炉结构和工作原理有深刻的理解,并具有高度的工作责任心。

第四节 锅炉设备的基本特性

表徵锅炉特性的主要是容量、蒸汽参数和热效率。

(1) 锅炉的容量 一般指锅炉每小时的最大连续蒸发量,又称为额定容量或额定蒸发量。常用符号 D_e 表示,单位为吨/时。

(2) 锅炉的蒸汽参数 一般指过热器出口处的蒸汽压力和温度。蒸汽压力的符号用 p ,单位为公斤/厘米²;蒸汽温度的符号用 t ,单位为℃。

(3) 锅炉的热效率 指锅炉输出热量与输入热量的比值,用符号 η 表示,即:

$$\eta = \frac{\text{输出热量}}{\text{输入热量}} \times 100\%$$

第五节 锅炉的分类和型号

锅炉的分类方法很多,主要有:

(1) 按燃烧方式分 有层燃炉、室燃炉、旋风炉、沸腾炉等;

(2) 按燃用燃料分 有燃煤炉、燃气炉、燃油炉等;

(3) 按水循环特性分 有自然循环锅炉、强制循环锅炉、复合循环锅炉等;

(4) 按锅炉容量分 有小容量锅炉($D_e < 220$ 吨/时)、中容量锅炉($D_e = 220 \sim 410$ 吨/时)、大容量锅炉($D_e \geq 670$ 吨/时);

(5) 按蒸汽参数分 有低压锅炉($p \leq 13$ 公斤/厘米²)、中压锅炉($p = 25 \sim 39$ 公斤/厘米²)、高压锅炉($p = 100$ 公斤/厘米²)、超高压锅炉($p = 140$ 公斤/厘米²)、亚临界压力锅炉($p = 170$ 公斤/厘米²)、超临界压力锅炉($p \geq 225$ 公斤/厘米²)等;

(6) 按燃煤炉的排渣方式分 有固态排渣炉、液态排渣炉。

习惯上,在表示某一台锅炉的类型时,常同时指明其容量、蒸汽参数、水循环特性以及燃料特性等。

我国锅炉目前采用三组字码表示其型号,如HG-410/100-1型锅炉。型号中第一组字码是锅炉制造厂名的汉语拼音缩写,如HG表示哈尔滨锅炉厂;SG表示上海锅炉厂;WG表示武汉锅炉厂;DG表示东方锅炉厂;BG表示北京锅炉厂等。型号中第二组字码的分子表示锅炉容量,分母表示蒸汽压力(表压)。第三组字码表示产品的设计序号。因此,前述

HG-410/100-1型锅炉即表示哈尔滨锅炉厂制造、容量为410吨/时、蒸汽压力为100公斤/厘米²采用第一序号设计制造的锅炉。

对于有中间再热器的锅炉，在上述二、三组字码间又加了一组字码，其分子表示过热蒸汽温度，其分母表示再热后的蒸汽温度。如图0-2的SG-400/140-555/555-1型锅炉即表示上海锅炉厂制造、容量400吨/时、过热蒸汽压力140公斤/厘米²、过热蒸汽温度555℃、再热蒸汽温度555℃的第一设计序号的锅炉。

第六节 国内外电站锅炉发展概况

解放前，我国没有电站锅炉制造业，解放后经过短期发展，于五十年代初即自行设计制造了40吨/时配6000千瓦汽轮发电机组的中压电站锅炉，五十年代后期又设计制造了230吨/时配50000千瓦汽轮发电机组的高压锅炉，一九六九年以来又连续设计制造了配125000千瓦、200000千瓦、300000千瓦汽轮发电机组的400吨/时、670吨/时、1000吨/时的高压、超高压和亚临界压力锅炉。逐渐形成了我国自己的电站锅炉系列。目前更大容量的电站锅炉也正在设计制造中。表0-1列出了几种已经投入发电运行的国产电站锅炉的简况。

当前，电站锅炉的发展还是着重在大容量、高参数和尽量采用先进技术方面下工夫。在国外，2000吨/时左右的锅炉已相当普遍，4000吨/时左右的巨型锅炉也早有多台投产运行。锅炉的蒸汽参数以亚临界压力和超临界压力者居多，但超临界压力的经济效果并不显著。锅炉燃料以煤和油为主，近些年由于世界油价飞涨，燃煤锅炉的比例有所增加。在水循环方式上，过去多为自然循环锅炉和直流锅炉，近些年复合循环锅炉日渐增多。

表 0-1 目前我国生产的几种电站锅炉简况

蒸发量 (吨/时)	蒸汽压力 (公斤/厘米 ²)	蒸汽温度 (°C)	配用汽机 功率 (万千瓦)	锅 炉 类 型
130	39	450	2.5	中压自然循环锅炉
220	100	540	5	高压自然循环锅炉，燃用煤粉或渣油
410	100	540	10	高压自然循环锅炉，燃用煤粉
400	140	555/555 ^①	12.5	超高压自然循环炉或直流炉，燃用煤或油或煤油两用，有蒸汽中间再热器
670	140	540/540	20	超高压自然循环锅炉，燃煤或油，悬浮燃烧或旋风燃烧，有再热器
935	170	570/570	30	亚临界压力直流锅炉，燃煤粉，有再热器
1000	170	555/555	30	亚临界压力直流锅炉，燃煤或油，有再热器

① 分子为过热蒸汽温度，分母为再热后的蒸汽温度，下同。

复习思考题

- 1.火力发电厂有哪三种能量转换过程？这些转换过程是在什么设备中完成的？
- 2.构成锅炉本体的主要设备有哪些？锅炉的主要辅助设备有哪些？锅炉设备是怎样进行工作的？
- 3.电站锅炉与工业锅炉相比有哪些主要特点？
- 4.我国锅炉型号中的各组字码都代表什么意思？

第一章 燃 料

第一节 概 述

所谓燃料，是指在燃烧过程中能够发出热量的物质。燃料必须具备两个条件：一是可燃；二是燃烧时可放出热量，且在经济上是合算的。

火力发电厂锅炉是耗用大量燃料的动力设备。锅炉工作的安全性、经济性均与燃料的性质有密切关系，燃料不同时，燃烧方式和燃烧装置亦不同，所以，对锅炉设计者和使用者来说，了解燃料的成分与性质是十分重要的。

燃料按物态分有固体、液体、气体三类；按获得方法可分为天然燃料和人工燃料。主要燃料示于表1-1。

表 1-1 燃 料 的 分 类		
按物态分 \ 按获得方法分	天 然 燃 料	人 工 燃 料
固 体 燃 料	木柴、煤、页岩	木炭、焦炭、煤粉等
液 体 燃 料	石 油	汽油、煤油、柴油、重油
气 体 燃 料	天然气	高炉煤气、发生炉煤气、炼焦炉煤气、地下气化煤气等

根据我国燃料利用原则，火力发电厂应尽可能不占用其他工业部门所必需的优质燃料，例如：炼焦用煤、机车用煤以及宜用于化学、医药等方面的有机燃料。因为把这些优质燃料用作火力发电厂的动力燃料时，只能取其热量，不能做到物尽其用。火力发电厂尽量利用劣质燃料，可以保证国家燃料资源得到充分地、合理地使用。

所谓劣质燃料，是指水分、灰分或硫分含量较多，燃烧比较困难，在其他方面没有多大经济价值的燃料。

火力发电厂还应尽可能地采用当地燃料，在有条件的煤矿、油田、气井附近建设坑口发电厂，就地利用资源并向外输送电力，可以减少运输负担，也可促进各地区天然资源的发展。按照我国的燃料政策，天然气、石油及石油制品不应作为火电厂动力燃料。我国燃油电厂数量不多，一般用石油炼制后的残余物，如重油、渣油作为燃料。高炉煤气是炼铁的副产品，除燃烧放热外再无其他用处，在钢铁厂内或邻近的电厂锅炉可以取它作为燃料。焦炉煤气也可作为锅炉燃料。从我国当前情况看，烧这些气体和液体燃料的锅炉还是少数，而燃煤锅炉还是主要的，所以本章着重介绍煤的成分及性质。

第二节 煤

一、煤的组成及其性质

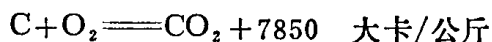
煤可按元素分析法和工业分析法研究其组成及性质。

1. 煤的元素分析成分

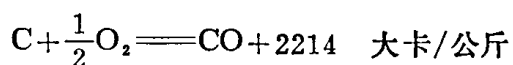
煤的元素分析成分包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、灰分(A)、水分(W)。其中碳、氢、硫是可燃的,其余都是不可燃的。这些成分并不是机械的混合物,而是呈复杂化合物存在于煤中。

煤中各种成分的性质如下:

(1) 碳 碳是煤中最主要的可燃元素,也是煤中最基本的成分,其含量约占40~85%。一公斤碳完全燃烧生成二氧化碳,能放出约7850大卡热量,即

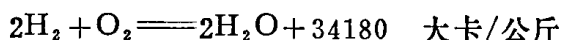


一公斤碳不完全燃烧时,生成一氧化碳,只能放出2214大卡热量,即



碳的燃烧特点是:不易着火,燃烧缓慢,火焰短。煤的碳化程度越深,即含碳量越多,着火和燃烧越困难。

(2) 氢 氢是煤中单位发热量最高的元素,但含量不多,约占3~6%。一公斤氢完全燃烧能放出34180大卡热量,同时生成水。即



但是氢燃烧生成的水还要吸收一部分热量蒸发为水蒸汽。所以在锅炉中氢燃烧实际放出的热量要比上述数值低。由于一公斤氢燃烧时生成9公斤水蒸汽,而水蒸汽的汽化潜热为600大卡/公斤,所以一公斤氢在锅炉中燃烧时实际放出的热量只有 $34180 - 9 \times 600 = 28780$ 大卡。

氢极易着火燃烧,燃烧速度也快。

(3) 氧 氧是煤中的杂质,不能产生热量。由于氧的存在,就使煤中的可燃元素含量相对减少。煤中的氧有两部分,一部分是游离氧,它能助燃;另一部分以化合物状态存在,不能助燃。

(4) 氮 氮也是煤中杂质,其含量约占0.5~1.5%,对锅炉工作影响不大。

(5) 硫 煤中的硫由有机硫、黄铁矿中的硫和硫酸盐中的硫三部分组成。前两种硫可以燃烧而构成所谓的挥发硫或可燃硫 S_R ,后一种不能燃烧而并入灰分之内。

硫是煤中的有害元素。虽然挥发硫燃烧可以放出一定的热量(约为2160大卡/公斤),但其燃烧产物是二氧化硫(SO_2),或三氧化硫(SO_3)气体。这种气体和水蒸汽结合生成亚硫酸或硫酸蒸汽,当烟气流经低温受热面时,若金属受热面温度低于硫酸蒸汽开始结露的温度(露点)时,硫酸蒸汽便在其上凝结,腐蚀锅炉尾部受热面,因此锅炉用煤含挥发硫不宜过高。

二氧化硫和三氧化硫气体,从烟囱排出时会污染大气,对人体和动植物都是有害的。

(6) 水分 水分也是煤中杂质。煤中水分由表面水分和固有水分组成。表面水分也叫外在水分(W_{wz}),它是因雨露冰雪或在开采过程中进入煤中的,依靠自然干燥可以除掉。固有水分也叫内在水分(W_{nz}),靠自然干燥不能除掉,必须把煤加热到102~105℃,并保持两小时后,才能除掉。

水分的存在会使煤中可燃元素含量相对减少，当煤燃烧时，水分蒸发还要吸收热量，使煤的实际发热量降低。

水分多的煤引燃着火困难，且会延长燃烧过程，降低燃烧室温度，增加不完全燃烧及排烟热损失，同时还会增加引风机的电能消耗。对制粉系统还会影响煤粉细度，降低磨煤机的出力，堵塞制粉管道，使煤粉仓、给粉机下粉不均匀和造成燃烧失常。

为了避免上述影响，需要将煤预先干燥。这样就往往使设备系统复杂化。

(7) 灰分 煤中含有不能燃烧的矿物质，在煤燃烧后形成灰分，灰分是煤中的主要杂质。

煤的含灰量越大，则煤的发热量就越低，开采运输等费用相对增加，同时还增大制粉系统的电耗。灰分容易隔绝可燃质与氧化剂的接触，因而多灰分的煤不易完全燃尽。熔化的灰常粘在受热面上形成结渣，结渣不易清除并影响传热。固态飞灰随烟气流，则会使受热面磨损与堵灰，由烟囱跑出的飞灰则还会污染大气影响卫生。为了清除各受热面溶渣和积灰及烟气中的细灰，需要有专门设备，这又会使设备和运行操作复杂化。

综上所述，碳是煤中最主要的可燃元素；氢是煤中单位发热量最高的元素；硫是可燃而又有害的元素；氮、氧、水分和灰分则是煤中的杂质。

煤的成分和组成可参见图1-1。

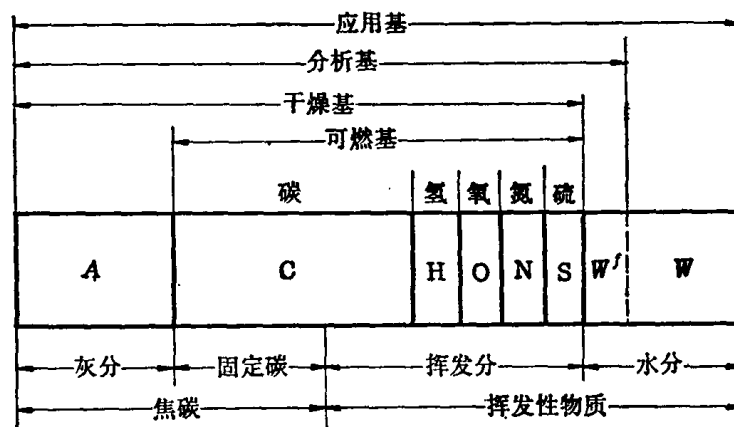


图 1-1 煤的成分及组成

2. 煤的工业分析成分

燃料的元素分析是比较复杂的，所以火力发电厂常采用工业分析法。工业分析的任务是按规定条件把煤试样进行干燥、加热和燃烧来确定煤中水分、挥发分、固定碳和灰分的百分含量，从而了解煤在燃烧方面的某些特性。工业分析是在实验室内进行的，以去掉表面水分的煤作为试样。

(1) 水分 把试样放在烘干箱内，保持102~105℃约两小时后，试样所失去的重量占原试样重量的百分数，即为该煤的水分值。

(2) 挥发分 把上述失去水分的试样置于不通风的条件下，加热到850℃±20℃，这时挥发性气体不断析出，约7分钟后可基本结束，煤失去的重量占原试样（未烘干加热

前)重量的百分数,即为该煤的挥发分值。

(3) 固定碳和灰分 去掉水分和挥发分后,煤的剩余部分称为焦炭。焦炭是由固定碳和灰分组成的。将焦炭放在 $800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 下灼烧(不要出现火焰),到重量不再变化时,取出来冷却,这时焦炭所失去的重量就是固定碳的重量,剩余部分则是灰分重量。这两个重量各占原试样重量的百分数,即是固定碳和灰分在煤中的含量。

二、煤成分基准及其换算

由于煤中水分和灰分的含量受外界影响而变化时,其他成分的百分含量也将发生变化,因此在用百分含量表示煤的种类和特性时,必须同时指明百分数的基准是什么。为了实际应用和理论研究的需要,煤成分有各种不同的基准,通常分为应用基、分析基、干燥基、可燃基四种。

(1) 应用基 应用基就是以进入锅炉设备的工作煤为基准,即俗称入炉煤的成分,包括灰分 and 全水分。它通常在各成分符号的右上角标“y”来表示各成分质量的百分值。即

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S_R^y + A^y + W^y = 100\% \quad (1-1)$$

(2) 分析基 分析基是用自然干燥后去掉外在水分的煤样作为分析基准的。这种基准的成分均在各成分符号的右上角标“f”来表示。即

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S_R^f + A^f + W^f = 100\% \quad (1-2)$$

(3) 干燥基 干燥基是以去掉外在和内在水分后的煤样作为基准的,这种基准的成分在各符号右上角标“g”来表示。即

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S_R^g + A^g = 100\% \quad (1-3)$$

对于灰分含量常用干燥基来表示。因不论煤中水分如何变更,干燥基总可以反映出所含灰分的多少。

(4) 可燃基 可燃基是从煤中除掉水分和灰分后的剩余部分作为试样的,虽然其中还有不可燃元素,但通常也称可燃基。以此为基准的成分含量叫可燃基成分。在各成分符号右上角标“r”表示。即

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_R^r = 100\% \quad (1-4)$$

煤的挥发分含量,通常以可燃基(V^r)来表示。它能确切的反映出煤燃烧的难易程度。

从以上各基准式可以看出,应用基成分是所有成分作为100%计算时的百分比;分析基成分是除掉表面水分后其余各项作为100%时的百分比;干燥基成分是除掉全水分后其余各项作为100%计算的百分比;可燃基成分是除掉全水分和灰分后其余各项作为100%计算的百分比。因此,在各种基准成分换算时只要乘上两种基的基数比就行了。

例如:已知干燥基的含碳量 C^g ,求应用基的含碳量 C^y 。

C^g 是前面六项成分作为基数的百分比,即

$$\begin{aligned} C^y &= \frac{C^g}{C^y + H^y + O^y + N^y + S_R^y + A^y} \times 100\% \\ &= \frac{C^g}{100 - W^y} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-5)$$

移项后得

$$C^y = C^g \times \frac{100 - W^y}{100} \% \quad (1-6)$$

干燥基的其他成分都可用相仿的方法换算到相应的应用基成分，这时的换算系数都是 $\frac{100 - W^y}{100}$ 。

燃料其他各基准间的换算系数也可用类似的方法求得，现将各换算系数列于表1-2。

表 1-2 煤 的 基 准 换 算 系 数

已知煤的基准	欲 求 煤 的 基 准			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	1	$\frac{100 - W^f}{100 - W^y} \textcircled{2}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y - A^y}$
分 析 基	$\frac{100 - W^y}{100 - W^f} \textcircled{1}$	1	$\frac{100}{100 - W^f}$	$\frac{100}{100 - W^f - A^f}$
干 燥 基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^d}$
可 燃 基	$\frac{100 - W^y - A^y}{100}$	$\frac{100 - W^f - A^f}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1

① 用此系数换算水分时，所得为应用基的内在水分，即 W_{Nz}^y 。

② 用此系数换算水分时，已知的是应用基的内在水分 W_{Nz}^y 。

三、煤的主要特性

1. 发热量

单位量的燃料在完全燃烧时所放出的热量称为燃料的发热量（热值），其单位为大卡/公斤（固体、液体燃料）或大卡/标准米³（气体燃料）。

燃料的发热量有高位和低位之分，所谓高位发热量是指一公斤燃料完全燃烧时放出的全部热量。包括烟气中水蒸汽已凝结成水所放出的汽化热。但是，锅炉排烟温度在 110~160℃ 之间，烟气中水蒸汽的分压力很低，通常都不会凝结，所以在炉内这部分汽化潜热，不应计入燃料发热量之内。从燃料高位发热量中扣出这部分热量后就称为低位发热量。我国锅炉技术中均习惯于采用低位发热量。

对于煤的应用基，高位发热量和低位发热量之差为：

$$\begin{aligned} Q_d^y - Q_b^y &= 600 \times \left(\frac{9H^y}{100} + \frac{W^y}{100} \right) \\ &= 6(9H^y + W^y) \text{ 大卡/公斤} \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 Q_d^y 、 Q_b^y ——分别表示高位和低位发热量，大卡/公斤；

$\frac{9H^y}{100}$ ——氢燃烧所生成的水蒸汽（1 公斤氢燃烧生成 9 公斤水蒸汽）；

$\frac{W^y}{100}$ ——全水分生成的水蒸汽；

600——水蒸汽的汽化潜热，大卡/公斤。

对于分析基、干燥基和可燃基高位发热量和低位发热量之差为：

$$Q_G^f - Q_D^f = 6(9H^f + W^f) \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-8)$$

$$Q_G^g - Q_D^g = 54H^g \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-9)$$

$$Q_G^r - Q_D^r = 54H^r \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-10)$$

式(1-9)和(1-10)只有一项，因为干燥基和可燃基中已经没有水分。

对于高位发热量来说，水分只占据了重量的一定份额，对低位发热量来说水分不仅占据了重量的一定份额，而且还要吸收汽化热。因此，在各种基准的高位发热量之间可以用直接乘上换算系数（见表1-2）的方法进行换算，对于应用基和分析基的低位发热量则不可，必须考虑水的汽化热。

例如，把煤的分析基高位发热量换算为应用基低位发热量，先要求出应用基的高位发热量。即

$$Q_G^y = Q_G^f \times \frac{100 - W^y}{100 - W^f} \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-11)$$

然后求：

$$\begin{aligned} Q_D^y &= Q_G^y - 6(9H^y + W^y) \\ &= Q_G^f \times \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 6(9H^y + W^y) \end{aligned} \quad (1-12)$$

煤的发热量可以用氧弹热量计进行测定，也可以用经验公式进行计算，经验公式如下：

$$Q_G^y = 81C^y + 300H^y - 26(O^y - S^y) \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-13)$$

$$Q_D^y = 81C^y + 246H^y - 26(O^y - S^y) - 6W^y \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-14)$$

同一种煤的发热量用仪器测得的和用经验公式计算得到的数值，误差一般不超过3~4%。

在锅炉设计和实验中，国家标准规定应该使用热量计测得的发热量。

燃料中含有的杂质，如灰分、水分和硫分等，对锅炉的工作有直接影响。但只看它们的百分含量大小来估计给锅炉带来的危害是不够的。为了看清杂质的危害程度，常引入折算水分、折算灰分和折算硫分的概念，以便进行比较。所谓折算成分就是在发热量中每1000大卡热量所对应煤的成分。其计算公式如下：

$$W_{zs}^y = \frac{W^y}{\frac{Q_D^y}{1000}} = 1000 \frac{W^y}{Q_D^y} \% \quad (1-15)$$

$$A_{zs}^y = \frac{A^y}{\frac{Q_D^y}{1000}} = 1000 \frac{A^y}{Q_D^y} \% \quad (1-16)$$

$$S_{zs}^y = \frac{S^y}{\frac{Q_D^y}{1000}} = 1000 \frac{S^y}{Q_D^y} \% \quad (1-17)$$

若煤的 $W_{zs}^y > 8\%$ 、 $S_{zs}^y > 0.2\%$ 或 $A_{zs}^y > 4\%$ ，则分别称为高水分、高硫分或高灰分的煤。