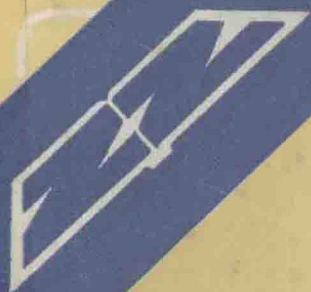


中等专业学校教材



锅炉设备及运行

西安电力学校 李恩辰
武汉电力学校 徐贤曼 合编



中等专业学校教材

锅炉设备及运行

西安电力学校 李恩辰
武汉电力学校 徐贤曼 合编

江苏工业学院图书馆
藏书章

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书内容包括：燃料及燃烧计算；锅炉热平衡及计算；煤粉特性及制粉系统；燃烧原理及燃烧设备；锅炉自然水循环及强制水循环原理；蒸汽净化；锅炉各受热面的布置及工作特性；锅炉传热计算及通风阻力计算；锅炉启停及运行调节等。

本书是电力中等专业学校电厂热能动力专业教材，也可供电厂工作人员自学、参考。

中等专业学校教材

锅炉设备及运行

西安电力学校 李恩辰 合编
武汉电力学校 徐贤曼

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市樱花印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 19印张 439千字 1插图

1991年9月第一版 1995年4月北京第二次印刷

印数21191—28240册

ISBN7-120-01356-4/TK·222

定价 10.90元

前 言

本书是电力中等专业学校电厂热能动力设备专业教材，内容依据本专业《锅炉设备及运行》课程教学大纲编写。全书的单位采用法定计量单位。

本书主要阐述发电厂锅炉的结构、工作原理、计算方法和运行调节的一般规律。

本书第一、三、四、十三、十四章为西安电力学校李恩辰编写；第二、五、六、七、八、九、十章为武汉电力学校徐贤曼编写；第十一、十二、十五章为西安电力学校李聪编写。全书由李恩辰统稿。

本书由北京电力专科学校刘玉铭主审。

在本书编写过程中，曾得到各兄弟学校、有关发电厂、电力设计院和锅炉制造厂的大力支持和帮助，在此特致衷心的感谢。

由于水平所限，恳请读者对书中缺点、错误之处加以指正。

编 者

1990年10月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 锅炉在火力发电厂中的地位	1
第二节 电站锅炉的构成及工作过程	1
第三节 锅炉设备的基本特性	2
第四节 电站锅炉的特点	3
第五节 锅炉的分类和型号	3
第六节 国内外电站锅炉的发展概况	4
第二章 燃料	5
第一节 煤的成分及分析基准	5
第二节 煤的主要特性	10
第三节 发电用煤的分类	13
第四节 液体燃料和气体燃料	15
第三章 燃料燃烧计算	18
第一节 燃烧的化学反应	18
第二节 燃料燃烧时的空气需要量	19
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 根据烟气成分求过量空气系数	26
第六节 烟气焓的计算	28
第四章 锅炉热平衡	33
第一节 锅炉热平衡方程	33
第二节 锅炉的输入热量 Q_1	34
第三节 机械不完全燃烧热损失 q_4	35
第四节 化学不完全燃烧热损失 q_3	37
第五节 排烟热损失 q_2	38
第六节 散热损失 q_6	39
第七节 灰渣物理热损失 q_5	40
第八节 锅炉总有效利用热、热效率及燃料消耗量	40
第九节 锅炉热平衡试验简介	41
第五章 煤粉制备	43
第一节 煤粉的性质及品质	43
第二节 煤的可磨性与磨损性	46
第三节 磨煤机	47

第四节	制粉系统	57
第五节	制粉系统的辅助设备	61
第六节	制粉系统热平衡	66
第六章	燃料燃烧原理及燃烧设备	71
第一节	燃料燃烧的基本原理	71
第二节	典型燃烧方式和炉型	77
第三节	煤粉气流的燃烧过程	80
第四节	煤粉燃烧器及炉内空气动力特性	84
第五节	点火装置	93
第六节	煤粉炉的炉膛	94
第七节	油燃烧设备	98
第七章	蒸发设备及自然水循环原理	103
第一节	锅炉蒸发设备	103
第二节	自然水循环原理	109
第三节	自然水循环工作的可靠性指标	112
第四节	循环回路的特性曲线	115
第五节	自然水循环常见故障及安全性检查	117
第六节	提高水循环安全性的措施	122
第八章	蒸汽净化	125
第一节	蒸汽含盐的危害及蒸汽的质量标准	125
第二节	蒸汽污染的原因	126
第三节	提高蒸汽品质的途径	130
第四节	汽包内部装置示例	136
第九章	过热器与再热器	139
第一节	过热器和再热器的作用与工作特点	139
第二节	过热器的型式结构及其汽温特性	140
第三节	热偏差	144
第四节	再热器的特点	148
第五节	蒸汽温度的调节方法	149
第六节	过热器、再热器系统	153
第七节	过热器和再热器烟气侧的高温积灰与腐蚀	156
第十章	省煤器和空气预热器	158
第一节	概述	158
第二节	省煤器	159
第三节	空气预热器	162
第四节	尾部受热面的磨损、积灰、腐蚀	166
第十一章	强制循环锅炉	173
第一节	直流锅炉	173
第二节	多次强制循环锅炉的工作原理	182
第三节	复合循环锅炉简介	183

第十二章	锅炉整体布置	188
第一节	影响锅炉整体布置的主要因素	188
第二节	锅炉的典型布置	188
第三节	典型锅炉简介	189
第十三章	锅炉受热面的传热计算	199
第一节	炉膛的传热计算	199
第二节	对流受热面热力计算的基本原理和方法	209
第三节	屏式过热器的热力计算	225
第四节	凝渣管热力计算的特点	228
第五节	对流过热器及再热器热力计算的特点	229
第六节	省煤器热力计算的特点	230
第七节	空气预热器热力计算的特点	231
第八节	锅炉热力计算误差检查	234
第十四章	锅炉通风阻力计算	237
第一节	通风阻力的一般计算	237
第二节	锅炉烟道阻力计算	252
第三节	锅炉风道阻力计算	256
第四节	风机选择及烟囱高度的确定	259
第十五章	锅炉运行	261
第一节	锅炉的启动和停运	261
第二节	汽包锅炉的运行调节	268
第三节	锅炉在非设计工况下的运行	276
第四节	单元机组中锅炉变压运行的概念	281
第五节	直流锅炉的运行和启停特点	282
第六节	制粉系统的运行	289
第七节	锅炉事故	293

第一章 绪 论

第一节 锅炉在火力发电厂中的地位

随着我国现代化建设的不断发展，能源特别是电力在国民经济中的作用将更加突出。

电一般是在发电厂中生产的。当前，世界上主要有三类发电厂：火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。而火力发电厂是目前世界和我国电能生产的主力。

火力发电厂的生产过程可简要的用图1-1表示。燃料在锅炉1中燃烧放热并将水加热成为具有一定压力和温度的蒸汽，蒸汽沿主蒸汽管道进入汽轮机2膨胀作功并带动发电机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凝结成水，后被凝结水泵5打入除氧器7，在除氧器中水被抽汽管6来的蒸汽加热除氧后，又通过给水泵8加压打回锅炉。火力发电厂的生产过程就是不断重复上述循环的过程。

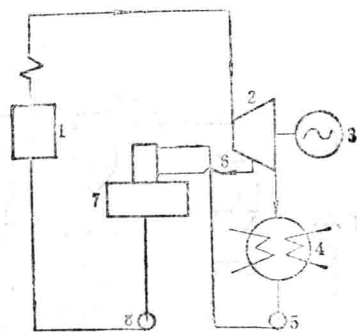


图 1-1 火力发电厂生产过程示意
1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—抽汽管；7—除氧器；8—给水泵

由此看出，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热能；在汽轮机中热能转化为机械能；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 电站锅炉的构成及工作过程

锅炉设备一般是由锅炉本体和辅助设备组成的。锅炉本体主要包括燃烧器、炉膛、布有受热面的烟道、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器、省煤器，及空气预热器等。辅助设备包括送风机、引风机，给煤机、磨煤机、排粉机，除尘器及烟囱等。

发电用的锅炉称为电站锅炉。燃煤粉的电站锅炉可用图 1-2 简要地说明其构成及工作过程。由输煤皮带运来的煤落到煤斗13中，经给煤机14送入磨煤机15磨制成粉后，被自热风管12来的热风送入粗粉分离器16，在粗粉分离器中不合格的粗粉被分离出来沿回粉管23再回到磨煤机重新磨制，合格的煤粉则沿管道被送到细粉分离器17进行气粉分离，分离出的煤粉送入煤粉仓18并通过给粉机19按锅炉燃烧的需要送入一次风管21中，分离出的乏气被排粉机20抽走并通过一次风管将煤粉带上后经过燃烧器22吹入炉膛23燃烧。二次风自二次风管27经燃烧器同时吹入炉膛助燃。燃烧后的烟气经水平烟道、垂直烟道、除尘器24、引风机25后通过烟囱26排入大气。风经抽风管9、送风机10、空气预热器11、热风管12送入

炉膛及制粉系统。以上所述煤、风、烟系统称为锅炉的燃烧系统，即一般说的“炉”。给水经给水泵1送入省煤器2和汽包3，然后进入下降管4、水冷壁5加热后又回到汽包并分离，分离出的水继续进入下降管循环，分离出的汽经屏式过热器6和对流过热器7升温后，通过主蒸汽管道8送入汽轮机作功。上述为汽水系统，即一般说的“锅”。炉的任务是尽可能有效的放热，锅的任务是尽量把炉放出的热量有效的吸收。锅和炉组成了一个完整的能量转换系统。

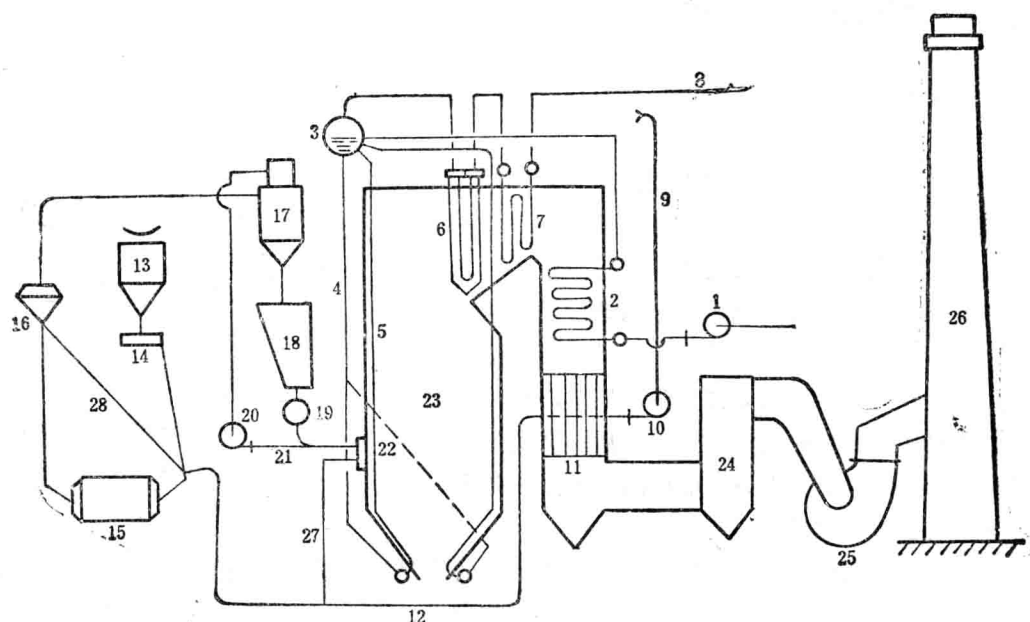


图 1-2 电站锅炉构成及工作过程示意

1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—水冷壁；6—屏式过热器；7—对流过热器；8—主蒸汽管道；9—送风机抽风管；10—送风机；11—空气预热器；12—热风管道；13—煤斗；14—给煤机；15—磨煤机；16—粗粉分离器；17—细粉分离器；18—煤粉仓；19—给粉机；20—排粉机；21—一次风管；22—燃烧器；23—炉膛；24—除尘器；25—引风机；26—烟囱；27—二次风管；28—回粉管

第三节 锅炉设备的基本特性

表征锅炉设备的基本特性如下：

(1) 锅炉容量 一般指锅炉每小时的最大连续蒸发量，又称额定容量或额定蒸发量，常用符号为 D_e ，单位为 t/h （吨/时）。

(2) 蒸汽参数 一般指过热器出口处的蒸汽压力和蒸汽温度。蒸汽压力符号为 p ，单位为 MPa （百万帕）；蒸汽温度符号为 t ，单位为 $^{\circ}C$ 或 K 。

(3) 锅炉热效率 指锅炉的有效输出热量占输入热量的百分数，常用符号为 η ，即

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

第四节 电站锅炉的特点

电站锅炉与工业锅炉相比，有以下明显的特点：

(1) 容量大 工业锅炉容量一般只有 4~20t/h，35t/h 以上的就很少了；电站锅炉容量多在 220~1000t/h，在我国，近 2000t/h 的电站锅炉也已有多台运行。

(2) 蒸汽参数高 工业锅炉蒸汽压力多在 2.5MPa 以下，蒸汽温度多在 400℃ 以下；而电站锅炉蒸汽压力多在 9.8MPa 以上，蒸汽温度多在 540℃ 以上。

(3) 自动化程度高 工业锅炉目前仅处于由半机械化向全机械化发展的过程中；而电站锅炉早在 50 年代就已实现全部机械化和远动化，到目前已实现了全盘自动化。

(4) 热效率高 工业锅炉热效率仅为 60%~80%；而电站锅炉热效率多稳定在 90% 以上。

总之，电站锅炉是一套蒸发量大、结构复杂、自动化程度很高的设备。要掌握这样的设备，除具有高度的工作责任心外，还必须对锅炉结构和工作原理的深刻理解。

第五节 锅炉的分类和型号

锅炉的分类方法有很多种，主要有：

(1) 按燃烧方式分 层燃炉、室燃炉、旋风炉、沸腾炉等。

(2) 按燃用燃料分 燃煤(粉)炉、燃气炉、燃油炉等。

(3) 按水循环方式分 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 小容量锅炉($D_e < 220\text{t/h}$)、中容量锅炉($D_e = 220 \sim 410\text{t/h}$)、大容量锅炉($D_e \geq 670\text{t/h}$)。

(5) 按蒸汽参数分 低压锅炉($p \leq 2.45\text{MPa}$, 表压)、中压锅炉($p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$, 表压)、高压锅炉($p = 7.84 \sim 10.8\text{MPa}$, 表压)、超高压锅炉($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$, 表压)、亚临界压力锅炉($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$, 表压)和超临界压力锅炉($p \geq 22.1\text{MPa}$, 表压)等。

(6) 按燃煤炉的排渣方式分 固态排渣炉和液态排渣炉。

习惯上，在表示某台锅炉的类型时，常同时指明其容量、参数、水循环方式及燃料特性等。

锅炉的型号常用下列形式表示：

制造厂家-锅炉容量/过热蒸汽压力-过热蒸汽温度/再热蒸汽温度-锅炉设计序号。如 DG-670/13.7-540/540-8 型，即表示东方锅炉厂制造的 670t/h 锅炉，其过热蒸汽压力为 13.73MPa、过热蒸汽温度为 540℃、再热蒸汽温度也是 540℃，8 则表明该厂这类型号(容量、压力、温度)锅炉的设计序号为 8。

第六节 国内外电站锅炉的发展概况

我国于50年代初开始自行设计并制造电站锅炉。第一台电站锅炉是40t/h配6MW汽轮发电机组的中压链条炉。50年代后期又设计制造了230t/h配50MW机组的高压煤粉炉。60年代、70年代又陆续设计制造了配125MW、200MW、300MW机组的400t/h、670t/h、1000t/h的高压、超高压和亚临界压力锅炉。进入80年代后开始制造2000t/h配600MW汽轮发电机组的巨型锅炉。但是,与国外相比,中国的火力发电技术尚处于中等水平。在技术发达的国家,4000t/h左右配1300MW汽轮发电机组的电站锅炉已投运多年。

目前在世界范围内,电站锅炉的发展仍是着重在大容量、高参数和尽量采用先进技术方面。水循环方式仍以自然水循环为主。随着锅炉容量和蒸汽压力的提高,采用复合循环的锅炉日渐增多。

在我国,随着改革开放的进行和电力技术教育的发展,电力工业的运行管理技术也得到了迅速发展,目前电厂的运行控制已开始由单元控制向炉、机、电集中控制转移,百万千瓦以上的电站日渐增多。而在技术发达国家,火电厂的控制已基本上实现了炉、机、电的集中控制。

复 习 思 考 题

1. 火力发电厂存在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明显特点?

第二章 燃 料

除核燃料外，燃料是指能与氧发生强烈化学反应，以取得热量的物质。

电站锅炉是耗用大量燃料的动力设备。锅炉工作的安全性和经济性，与燃料性质密切相关。燃料性质不同，燃烧方式、燃烧设备及运行操作也各不相同。因此，了解燃料的性质及其对锅炉工作的影响，对从事热能动力技术与管理工作的人员来说，是不可缺少的基础知识。

燃料按状态不同，可分为固体、液体与气体三类。固体燃料主要是煤；液体燃料主要是石油的不同分馏产物及残渣；气体燃料主要是天然气与冶金工业副产品——高炉煤气、焦炉煤气。

燃料不仅是动力锅炉的主要能源，而且是冶金、化工等工业的重要原料。动力锅炉所用燃料仅利用其热能，被称为动力燃料。而其它工业部门所需燃料，不仅用来取得热能，而且还需满足某些生产工艺的特殊要求。如冶金工业要求用含硫量少、焦结性强的煤炼焦；国防、运输部门要求燃用灰分少、发热量高的轻质油；化工要求大量石油、天然气作原料等。为了合理利用燃料资源，使物尽其用，我国的燃料政策是：石油、天然气和某些优质煤应优先供应给冶金、国防、化工等部门。对电厂锅炉来说，则以煤作主要燃料，并尽量利用水分、灰分含量较高，燃烧比较困难，对其它工业没有多大经济价值的劣质煤。某些工业副产品，如渣油、高炉煤气也可作为锅炉的燃料。但是，这些燃油、燃气锅炉毕竟为数不多，因此本章内容以介绍煤为主。

第一节 煤的成分及分析基准

煤由可燃的有机物与不可燃的矿物质、水分组成，其分子结构很复杂。为了实用方便，通过元素分析和工业分析来确定煤各组成物质的含量。

元素分析测出煤的有机物由碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)五种元素组成，它们以复杂的化合物存在于煤中。工业分析测出煤的组成成分为水分(W)、挥发分(V)、固定碳(FC)和灰分(A)。煤的有机物则由挥发分(V)和固定碳(FC)组成。

一、煤的组成成分及其特性

煤由碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)五种元素成分和水分(W)、灰分(A)组成。在下面分析中，各元素成分的含量以占五种元素成分总和的质量百分数表示；水分、灰分则以占工作煤的质量百分数表示。下面阐述各种成分的特性：

1. 碳

碳是煤中主要的可燃元素，其含量约占55%~95%。每kg碳完全燃烧约放出32836kJ

的热量，即



碳是煤发热量的主要来源。在加热时煤中的碳一部分与氢、氧、硫等结合成为挥发性的有机化合物，其余部分呈单质状态称为固定碳。煤的地质年代越长，碳化程度越深，含碳量就越高，固定碳的含量相应也越多。固定碳不易着火，燃烧缓慢。因此，含碳量越高的煤，着火及燃烧都比较困难。

2. 氢

氢是煤中发热量最高的元素。每kg氢燃烧可放出约 $120 \times 10^3 \text{ kJ}$ 的热量。但煤中氢的含量不高，大多在 3%~6%。随着煤的碳化程度加深，氢的含量逐渐减少。氢一部分与氧结合成为稳定的化合物，不能燃烧；另一部分存在于可燃有机物中，称为游离氢，这部分氢易着火、燃烧快，是煤中最有利的成分。

3. 氧和氮

氧和氮都是煤有机物中不可燃成分，被称作煤的内部杂质。氧常与煤中氢或碳呈化合状态，使煤中可燃元素相对减少，煤的发热量因此有所降低。煤中氧的含量变化较大，从 1%或2%到最高可达40%。煤的地质年代愈短，氧的含量愈高。煤中氮的含量仅为0.5%~2%。氮是一种惰性元素，但在高温下可与氧结合成氮的氧化物 (NO_x)，造成大气污染。

4. 硫

煤中含硫量一般不超过 2%，但个别煤种可高达 8%~10%。硫在煤中以三种形式存在，有机硫（与煤中C、H、O结合成复杂的化合物）、黄铁矿硫 (FeS_2) 和硫酸盐硫（如 CaSO_4 、 MgSO_4 、 FeSO_4 等）。前两种硫均能燃烧，称为可燃硫或挥发硫，每 kg 硫燃烧可放出 9040 kJ 的热量。硫酸盐硫不能燃烧，属于灰分的一部分。我国煤的硫酸盐硫含量很少，可忽略不计，一般可用全硫代表可燃硫。

硫的燃烧产物 SO_2 ，其中一部分氧化成为 SO_3 。 SO_3 与烟气中的水蒸汽结合成硫酸蒸汽。硫酸蒸汽若在低温受热面上凝结，将对金属造成强烈的腐蚀。烟气中的 SO_3 在一定条件下还可造成过热器、再热器烟气侧的高温腐蚀。煤中的黄化铁 (FeS_2) 质地坚硬，在煤粉磨制过程中将加速磨煤部件的磨损。此外，烟气中的硫化物排入大气，将影响人体健康与农作物生长。因此，硫是煤中有害的可燃元素。

5. 水分

水分是煤中的外部杂质，其含量差别较大，少的仅2%左右，多的可达50%~60%。一般随煤的地质年代的增长而减少，同时也受开采方法、运输、贮存条件的影响。

水分的存在，不仅降低了煤的发热量，而且增加了煤粉制备的困难，同时使着火推迟，炉膛温度降低。烟气中的水蒸汽可能造成空气预热器的腐蚀与堵灰，并增加烟气带走的热量损失及引风机电耗。因此，水分是煤中有害成分。

6. 灰分

灰分是煤燃烧后剩余的不可燃矿物质残渣，也是煤的外部杂质，它与燃烧前煤中的矿物质在成分与数量上有较大区别。不同煤的灰分含量差别很大，一般 5%~35%，高的可

达50%。灰分不仅降低煤的发热量，而且影响煤的着火与燃烧。烟气中的灰粒，是受热面积灰、磨损、结渣的根源，还将造成环境污染。显然，灰分是煤中的有害成分。

二、煤的工业分析

煤的元素成分及水分、灰分含量是燃烧计算的依据。但是，元素成分并不能说明它们在煤中组成何种化合物，也就不能充分地确定煤的性质。同时，煤的元素分析方法比较复杂，电厂经常采用的是较简单的煤的工业分析。工业分析是在规定条件下对煤样进行干燥、加热和燃烧，测定煤中水分（W）、挥发分（V）、固定碳（FC）和灰分（A）。这些成分正是煤在炉内燃烧过程中分解的产物。因此，煤的工业分析成分能更直接地反映煤的燃烧特性，也是发电用煤分类的重要依据。

在煤的工业分析成分中，水分、灰分、固定碳的性质在煤的组成成分及性质中已作说明，下面着重介绍工业分析测定的条件与挥发分的性质。

1. 水分

煤的水分由表面水分和固有水分组成。表面水分又称外在水分（ W_n ），它是在开采、运输和保管过程中，附着于煤粒表面的外来水分，如雨雪、地下水或人工润湿等。表面水分可以通过自然干燥除去，自然干燥一直进行到煤中水蒸汽分压力与空气中水蒸汽分压力相等时为止。去掉表面水分后煤所具有的水分，称固有水分或内在水分（ W_n ）。固有水分不能通过自然干燥除掉，必须将煤加热至105~110℃，对褐煤甚至到145℃才能除去。由于空气中水蒸汽分压力是变化的，这将影响煤的水分测定。为此，在实验室一定条件下，对煤样进行自然干燥后所测得的内在水分称为分析水分 W' 。

2. 挥发分

失去水分的煤加热至一定温度时，煤中有机质分解而析出的气体，称为挥发分。挥发分主要由各种碳氢化合物 C_mH_n 、氢 H_2 、一氧化碳 CO 、硫化氢 H_2S 等可燃气体组成。此外，还有少量的氧 O_2 、二氧化碳 CO_2 、氮 N_2 等不可燃气体。其组成元素为氢、氧、氮、硫和部分碳，如图2-1所示。

挥发分不是煤中固有的物质，而是煤加热分解后析出的产物。不同碳化程度的煤，挥发分析出的温度和数量是不同的。碳化程度愈浅的煤，挥发分开始析出的温度愈低；挥发分析出的数量随煤碳化程度的提高而减少。挥发分析出的数量除决定煤本身的性质外，还受加热条件的影响，加热时间愈长，加热温度愈高，则析出的挥发分愈多。因此，在实用分析时，将失去水分的煤试样，在 $900 \pm 10^\circ C$ 温度下，隔绝空气加热7min，试样所失去的质量作为挥发分数量。所以，测定的挥发分数值，只是一定条件下挥发分的产率，不能理解为煤中挥发分的固有含量。

不同煤的挥发分，燃烧时放出的热量相差很大，低的只有17000kJ/kg，高的可达71000kJ/kg。含氧量高、碳化程度低的煤，其挥发分的发热量则较低。

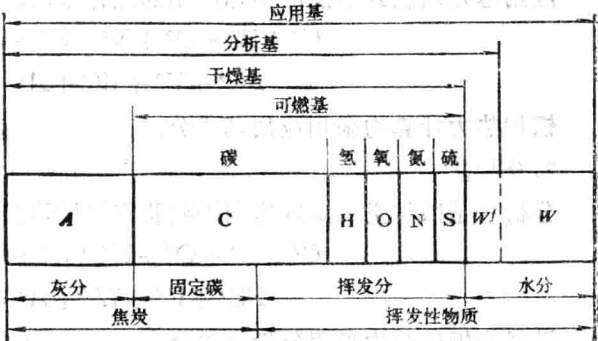


图 2-1 煤的成分及其与分析基准间的关系

由于挥发分比固定碳容易着火，加上挥发分析出后燃料的多孔性，增加了与助燃空气的接触面积。因此，挥发分愈多的煤，愈容易着火，燃烧也愈完全。鉴于挥发分对煤的性质与锅炉工作的重大影响，它已成为煤分类的重要依据。

3. 固定碳及灰分

煤中水分、挥发分析出后剩下的残留物称为焦炭，它包括固定碳及灰分。焦炭的粘结性与强度称为煤的焦结性。不同煤的焦结性差异很大，有的焦炭呈粉末状即不焦结；有的焦结性很强，结成硬焦块。煤的焦结性对层燃炉影响较大，粉末状焦炭易被空气带走，使燃烧不完全；强焦结性焦块又阻碍空气流通。在煤粉炉中，煤的焦结性对锅炉工作影响不大。

将焦炭在空气中加热至 $815 \pm 10^\circ\text{C}$ ，灼烧至恒重，固定碳基本烧尽，剩下的就是灰分。在煤的组成成分中，对锅炉工作影响较大的是硫分、灰分、水分及挥发分。

三、煤的成分分析基准及其换算

煤的成分是以质量百分数表示的，由于煤中水分、灰分常随外界条件而变化，其它成分的百分量也随着变化，因此煤中各成分的百分含量应注明百分数的基准才有意义。为了实际应用的需要和理论研究的方便，通常采用的基准有应用基、分析基、干燥基、可燃基四种。

1. 应用基

应用基是以收到状态的实际应用的煤作基准，其上标符号以 y 表示。

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

$$FC^y + V^y + W^y + A^y = 100\% \quad (2-2)$$

锅炉热力计算均采用应用基成分。

2. 分析基

分析基是以与空气湿度达到平衡状态的煤作基准，其上标符号以 f 表示。

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S^f + W^f + A^f = 100\% \quad (2-3)$$

$$FC^f + V^f + W^f + A^f = 100\% \quad (2-4)$$

燃料分析试验均采用分析基成分。

3. 干燥基

干燥基是以假想无水状态的煤作基准，其上标符号为 g 。

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g = 100\% \quad (2-5)$$

$$FC^g + V^g + A^g = 100\% \quad (2-6)$$

灰分含量常以干燥基表示。

4. 可燃基

可燃基是以假想无水无灰状态的煤作基准，其上标符号为 r 。

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100\% \quad (2-7)$$

$$FC^r + V^r = 100\% \quad (2-8)$$

可燃基成分稳定，常用来表示煤的挥发分与有机物中的各元素。

不同基准之间，可以互相换算。对同一煤种的同一成分，在不同基准中的质量是一样

前，只是计算基准不同，它们的相对质量百分数不同。现举例说明：

(1) 可燃基与应用基成分间的换算关系 式(2-1)可以改写为

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y = 100 - A^y - W^y \quad \%$$

可燃基成分是以假想无水无灰状态的煤作计算基准，

即
$$C^r = \frac{C^y}{C^y + H^y + O^y + N^y + S^y} \times 100 = \frac{100}{100 - A^y - W^y} C^y \quad \%$$

同理可得
$$\frac{C^r}{C^y} = \frac{H^r}{H^y} = \frac{O^r}{O^y} = \dots = \frac{100}{100 - A^y - W^y} \quad \%$$

式中 $\frac{100}{100 - A^y - W^y}$ 即由应用基换算为可燃基的换算系数。

(2) 应用基与分析基成分间的换算关系 分析基是以失去外在水分 W_w 的煤作计算基准，按上述分析可写成：

$$\frac{C^f}{C^y} = \frac{H^f}{H^y} = \dots = \frac{W^f}{W^y} = \frac{100}{100 - W_w^y} \quad \%$$

内在水分与外在水分之和为全水分，也就是煤的应用基水分 W^y 。煤的外在水分是以应用基作计算基准，内在水分是以分析基作计算基准，因此必须将分析水分 W^f 换算为应用基内在水分 W_w^y ，即

$$W^y = W_w^y + W_n^y = W_w^y + W^f \cdot \frac{100 - W_w^y}{100}$$

通过上式可得

$$W_w^y = 100 \left(\frac{W^y - W^f}{100 - W^f} \right)$$

由应用基换算为分析基的换算系数为

$$\frac{100}{100 - W_w^y} = \frac{100 - W^f}{100 - W^y}$$

同理可得不同基准间的换算系数，并列入表2-1中。各种基准之间的关系可用图2-1来说明。

【例 2-1】已知大同煤： $C^r = 83\%$ 、 $H^r = 4.4\%$ 、 $O^r = 11.1\%$ 、 $N^r = 1.0\%$ 、 $S^r = 0.5\%$ 、 $A^g = 24.73\%$ 、 $W^y = 7.0\%$ ，求煤的应用基成分。

解 按表2-1查得干燥基换算为应用基的换算系数为

$$\frac{100 - W^y}{100} = \frac{100 - 7}{100} = 0.93$$

则

$$A^y = 0.93 \times 24.73\% = 23\%$$

可燃基换算成应用基的换算系数为

$$\frac{100 - A^y - W^y}{100} = \frac{100 - 23 - 7}{100} = 0.7$$

则

$$C^y = 0.7 \times 83\% = 58.1\%$$

$$H^y = 0.7 \times 4.4\% = 3.08\%$$

$$O^y = 0.7 \times 11.1\% = 7.77\%$$

$$N' = 0.7 \times 1.0\% = 0.7\%$$

$$S' = 0.7 \times 0.5\% = 0.35\%$$

驗算

$$C' + H' + O' + N' + S' + A' + W'$$

$$= (58.1 + 3.08 + 7.77 + 0.7 + 0.35 + 23 + 7.0)\%$$

$$= 100\%$$

表 2-1

不同基准的换算系数

所求 已知	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	1	$\frac{100 - W'}{100 - W''}$	$\frac{100}{100 - W''}$	$\frac{100}{100 - A' - W''}$
分 析 基	$\frac{100 - W''}{100 - W'}$	1	$\frac{100}{100 - W'}$	$\frac{100}{100 - A' - W'}$
干 燥 基	$\frac{100 - W''}{100}$	$\frac{100 - W'}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A'}$
可 燃 基	$\frac{100 - A' - W''}{100}$	$\frac{100 - A' - W'}{100}$	$\frac{100 - A'}{100}$	1

第二节 煤 的 主 要 特 性

煤的工业分析除测定煤的工业分析成分外，还要测定煤的发热量、灰的熔融性、煤的可磨性与磨损性等。它们对锅炉及制粉系统的工作影响较大，是煤的主要特性。煤的可磨性与磨损性将在煤粉制备一章中说明，下面只讨论煤的发热量和灰的熔融性。

一、煤的发热量

煤的发热量有高位和低位之分。1kg煤完全燃烧所放出的热量，包括燃烧产物中水蒸气凝结成水所放出的汽化潜热，称高位发热量 Q_{gr} 。由于锅炉排烟温度一般在110~160℃，烟气中的水蒸汽不可能凝结成水而放出汽化潜热。因此，1kg煤完全燃烧所放出的热量，不包括燃烧产物中水蒸汽的汽化潜热时，称低位发热量 Q_{net} 。应用基煤的高位发热量与低位发热量之间有如下关系：

$$\begin{aligned} Q_{gr}' &= Q_{gr}'' - 2500 \left(\frac{9H'}{100} + \frac{W'}{100} \right) \\ &= Q_{gr}'' - 25(9H' + W') \quad \text{kJ/kg} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 2500——水在0℃时汽化潜热的近似值，kJ/kg；

$\frac{9H'}{100}$ ——1kg煤中氢燃烧生成的水蒸汽质量，kg；

$\frac{W'}{100}$ ——1kg煤中水分生成的水蒸汽质量，kg。

对于分析基、干燥基和可燃基煤的高位发热量与低位发热量之差，相应为

$$Q_{gr}' = Q_{gr}'' - 25(9H' + W') \quad (2-10)$$