

锅 炉 設 备

〔苏联〕 B. П. 斯密尔諾夫 著
Г. Ф. 克 諾 烈 主編

石 尙 达 譯

中 国 工 业 出 版 社

在本书中阐述了与热力发电厂现代动力锅炉设备有关的问题：燃料，燃料的生成、性质及其燃烧过程的计算；燃料燃烧方法的发展，现代燃烧装置的结构及煤粉制造设备；蒸汽锅炉的发展和现代高参数及超高蒸汽参数的锅炉型式；水循环，蒸汽锅炉的水质概况，制造锅炉用的材料及锅炉用的辅助设备。对锅炉机组的热力计算方法也作了说明。

本书系苏联动力技术学校《锅炉设备》课程的教科书，可供我国电力学校锅炉专业的学生，以及从事锅炉设备工作的工程技术人员参考。

В.П.Смирнов

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ-1959

* * *

鍋 炉 設 备

石 尙 达 譯

*

水利电力部办公厅图书编辑部編輯(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $22^{1/2}$ ·插頁1·字数453,000

1965年4月北京第一版·1965年4月北京第一次印刷

印数0001—5,480·定价(科六)2.80元

*

統一书号: 15165·3651(水电-481)

目 录

序 言	
第一章 鍋炉設備及其附件	1
第二章 燃料、燃料的成分及性质	3
2-1. 关于燃料的概念	3
2-2. 燃料成分及其元素的評價	3
2-3. 燃料的燃烧发热量	6
第三章 燃料的生成及分类	9
3-1. 固体燃料的生成	9
3-2. 固体燃料	10
3-3. 液体燃料	12
3-4. 气体燃料	14
第四章 燃料的燃烧	15
4-1. 燃料燃烧时的基本关系式	15
4-2. 空气和燃烧产物的体积計算	16
4-3. 按烟气分析数据进行的計算	19
第五章 鍋炉机组的热平衡	27
5-1. 热平衡方程式	27
5-2. 鍋炉机组内的热損失	28
5-3. 有效利用热量, 鍋炉机组 的效率和燃料消耗量	33
第六章 燃烧过程的物理性质和燃 烧装置的分类	35
6-1. 燃烧室的作用及其計算特征	35
6-2. 燃烧过程的基本型式	36
6-3. 燃烧过程的特性	39
第七章 炉排燃烧固体燃料的燃烧室	42
7-1. 人工操作的燃烧室	42
7-2. 半机械化的燃烧室	43
7-3. 机械化的燃烧室	45
7-4. 带有鏈条炉排的燃烧室	48
7-5. 带鏈条炉排的豎井燃烧室	55
第八章 煤粉制备, 制粉設備及計算	60
8-1. 粉状燃料的采用	60
8-2. 燃料的預先处理	60
8-3. 燃料的可磨性和煤粉細度	65
8-4. 煤粉制备系統	66
8-5. 煤粉制造設備	69
8-6. 煤粉制造設備的热力計算基础	78
第九章 煤粉燃烧室	85
9-1. 在煤粉燃烧室内煤粉空气 混合物的形成及燃烧过程	85
9-2. 煤粉噴燃器的結構	89
9-3. 燃烧室的水冷壁	95
9-4. 固态除渣的燃烧室	96
9-5. 液态除渣的燃烧室	98
第十章 豎井磨煤燃烧室	105
10-1. 豎井磨煤燃烧室的优缺点	105
10-2. 煤粉制备系統	105
10-3. 豎井式磨煤机	107
10-4. 分离用的豎井	111
10-5. 燃烧装置及豎井磨 煤燃烧室的布置	113
第十一章 旋风燃烧室	117
11-1. 燃料涡旋燃烧方式的发展及其 优缺点	117
11-2. 固态除渣的旋风燃烧室	118
11-3. 液态除渣的旋风燃烧室	120
11-4. 煤粉制备系統	125
第十二章 燃烧液体燃料和气体 燃料的燃烧室	127
12-1. 液体燃料和气体燃料的燃 烧过程及其优点	127
12-2. 燃烧气体燃料的噴燃器結構	128
12-3. 燃烧液体燃料的噴霧器結構	131
12-4. 輔助設備及燃烧室	133
12-5. 升火設備	134

第十三章 鍋炉机组的工作过程	136	的因素	196
13-1. 饱和蒸汽及过热蒸汽的生成	136	18-4. 鍋炉机组中过热蒸汽温度	
13-2. 压力和温度对水和蒸汽物理		的调节方法	198
性能的影响	137	第十九章 鍋炉机组的省煤器	206
13-3. 鍋炉机组内的热交换	139	19-1. 采用省煤器的意义及好处	206
13-4. 受热面金属壁的冷却	141	19-2. 省煤器的结构	207
13-5. 蒸汽鍋炉的蓄积能力	142	19-3. 省煤器的连接系统	211
第十四章 自然循环蒸汽鍋炉的发展	144	第二十章 鍋炉机组的空气预热器	212
14-1. 简单的圆筒形蒸汽鍋炉	144	20-1. 空气预热器的作用及其工	
14-2. 火管鍋炉	145	作条件	212
14-3. 臥式水管鍋炉	147	20-2. 間接换热的空气预热器	213
14-4. 立式水管鍋炉	151	20-3. 空气预热器的布置	215
第十五章 現代鍋炉机组設計的		20-4. 再生式空气预热器	217
一般方向	154	20-5. 为防止空气预热器冷端金	
15-1. 現代鍋炉机组設計的主要		屬腐蝕而采取的冷端金	
方向	154	屬温度的调节方法及調	
15-2. 設計鍋炉机组的主要要求	161	节系统	220
第十六章 在自然循环鍋炉机组中		第二十一章 蒸汽鍋炉中的水循环	
受热面的布置	166	計算	222
16-1. 現代鍋炉机组受热面部件		21-1. 概述	222
的布置	166	21-2. 基本概念及术语	222
16-2. 影响鍋炉机组布置的各种		21-3. 进行計算的方法	224
因素	168	第二十二章 电厂蒸汽鍋炉的水质	
第十七章 強制循环鍋炉及		概况	235
特种鍋炉	174	22-1. 水质对蒸汽动力设备的影响	235
17-1. 強制循环鍋炉工作过程的		22-2. 对鍋炉用水及蒸汽品质的要求	236
特点	174	22-3. 蒸汽鍋炉的排污	237
17-2. 直流鍋炉工作过程的特点	175	22-4. 防止給水中的剩余硬度	241
17-3. 直流鍋炉的结构	178	22-5. 从蒸汽鍋炉及过热器中排除	
17-4. 特种蒸汽鍋炉产生的原因	184	沉淀盐分的方法及所采用	
17-5. 双回路的蒸汽鍋炉	186	的设备	241
17-6. 帶有間接蒸发的蒸汽鍋炉	187	22-6. 水和蒸汽品质的检查	243
17-7. 維洛克斯型正压鍋炉	188	22-7. 汽水分离及蒸汽清洁设备	244
17-8. 两汽循环设备中的水銀鍋炉	189	第二十三章 制造鍋炉用的材料	
第十八章 鍋炉机组的过热器	191	及鍋炉元件的強	
18-1. 过热器的作用及构造	191	度計算	249
18-2. 在鍋炉机组烟道内过热器		23-1. 制造鍋炉用的材料	249
的布置型式和连接系统	192	23-2. 蒸汽鍋炉元件的强度計算	254
18-3. 影响过热器工作可靠性及		第二十四章 鍋炉机组的构架及炉墙	262
过热蒸汽出口温度数值		24-1. 鍋炉构架的作用及其结构	262

24-2. 在构架上汽鼓的固定·····	264	28-2. 烟风通道的阻力计算·····	308
24-3. 锅炉机组的炉墙·····	265	28-3. 自然引风·····	309
24-4. 耐火材料的性能及其质量 的评定·····	266	28-4. 机械通风设备·····	310
24-5. 炉墙材料的特性·····	267	28-5. 吸风机及送风机的特性及 其选择·····	312
24-6. 锅炉炉墙的构造·····	268	28-6. 引力的调节方法·····	313
24-7. 液态除渣燃烧室的炉底结构·····	275	第二十九章 锅炉房设备布置·····	315
第二十五章 锅炉机组的附件及配件·····	277	29-1. 基本布置原则·····	315
25-1. 锅炉机组的附件·····	277	29-2. 燃烧煤粉的锅炉房的布置·····	317
25-2. 锅炉机组的配件·····	281	29-3. 燃料炉排燃烧的锅炉房的布置·····	324
第二十六章 锅炉设备的除尘·····	283	第三十章 锅炉机组的热力计算·····	326
26-1. 概述·····	283	30-1. 热力计算的作用及其重要性·····	326
26-2. 机械干式惯性除尘器·····	284	30-2. 燃烧室热力计算的基本任务·····	327
26-3. 机械湿式惯性除尘器·····	287	30-3. 燃烧室内的热交换计算·····	327
26-4. 电气除尘器·····	288	30-4. 计算对流受热面用的基本公式·····	336
26-5. 联合除尘器·····	290	30-5. 温压的计算·····	336
第二十七章 锅炉设备的除灰·····	294	30-6. 对流受热面传热系数的计算·····	338
27-1. 概述·····	294	30-7. 锅炉机组按单级布置时各对 流受热面的计算方法·····	349
27-2. 水力除灰法·····	296	30-8. 在分两级加热空气的情况下 锅炉机组后部受热面的热 力计算特点·····	352
27-3. 气力除灰法·····	305	参考文献·····	354
27-4. 水力和气力联合除灰法·····	307		
第二十八章 通风设备和锅炉设备 的空气动力计算·····	308		
28-1. 通风设备的作用及其分类·····	308		

第一章 鍋炉設備及其附件

随着現代动力事业的高度和国民經济对电能及蒸汽热能需要量的日益增长，目前蒸汽和电能的生产已成了現代技术方面最发展的部門之一。

在現代的火力发电厂中，利用蒸汽来生产电能；在工业上，用蒸汽来带动机器，如：压缩机、蒸汽錘、水泵等。还有不少工业上的工艺过程，例如干燥、蒸煮和加热等，也都需要利用蒸汽。

蒸汽的热能还广泛地利用在取暖、通风和热水供应等方面。

鍋炉設備的作用，就是产生一定数量参数合格的蒸汽。鍋炉設備可以是一个独立的工业设备，也可以是火力发电厂中一个主要車間的設備之一。图1-1所示为火力发电厂主厂房的橫剖面簡图，在主厂房內布置着鍋炉房，或者是鍋炉房和汽机間。

鍋炉设备包括鍋炉机組（由燃烧室、产生蒸汽的鍋炉本体、过热器、省煤器、空气預热器、炉墙配件及附件等組成）及必需的輔助設備。这些輔助設備或放在鍋炉房內，或放在外面。

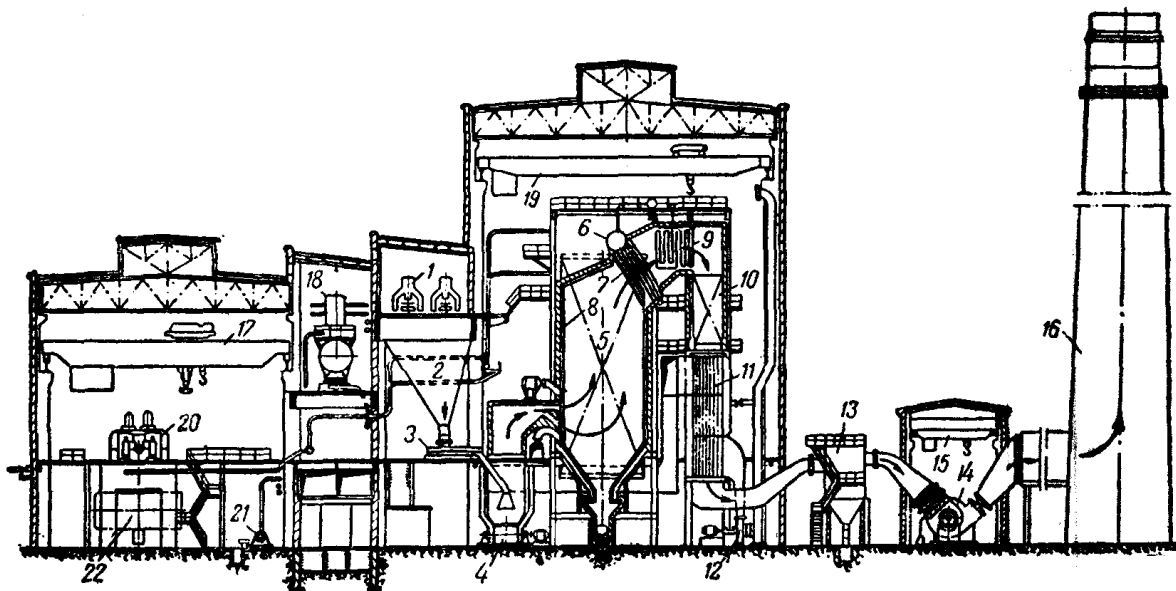


图 1-1 火力发电厂的簡图

- 1—原煤輸送机；2—原煤仓；3—給煤机；4—豎井式磨煤机；5—煤粉燃烧室；6—鍋炉汽鼓；7—垂影管和鍋炉排管；8—水冷壁；9—过热器；10—省煤器；11—空气預热器；12—送风机；13—除尘器；14—吸风机；15—吸风机間的起重機；16—烟囱；17—汽机間的起重機；18—除氧器；19—鍋炉房的起重機；20—汽輪发电机；21—給水泵；22—凝汽器

生产蒸汽、电能和热能的工艺过程順序如下：利用皮帶輸送机 1 把块状固体燃料自貯

煤仓中运来，送入鍋炉房的原煤斗 2 中，燃料由原煤斗出来，靠給煤机 3 送到磨煤机 4 中磨制。送入磨煤机的热空气，带着磨成粉状的燃料一起，到燃烧室 5 中进行燃烧。

燃料燃烧时放出的热量，靠炉內輻射热交換和烟道中高温烟气的对流放热，把热量传给鍋炉机組的受热面。

在空气預热器11中加热空气，空气靠送风机12送入空气預热器內，以后再到磨煤机和燃烧室中去。在省煤器10中加热給水。給水是靠給水泵送入省煤器內的。

加热后的給水，由省煤器出来，进到上汽鼓 6 中去。上汽鼓中的水沿着下水管通到蒸发受热面中去，自蒸发受热面得到的是饱和蒸汽。蒸发受热面不仅布置在燃烧室的內壁，組成水冷壁 8，而且还放在对流烟道內（見垂彩管和鍋炉排管 7）。

饱和蒸汽汇集在汽鼓內，从汽鼓出来后，进到过热器 9 中去，在过热器內加热到规定的温度。所有內部承受水或蒸汽压力的鍋炉受热面，都是由鋼制的弯管或蛇形管組成。管子端部固定在汽鼓或圓形的联箱上。

从过热器中得到的过热蒸汽，沿着蒸汽管道进到汽輪机20中去。汽輪机排出的蒸汽通到凝汽器22中去，在凝汽器內，蒸汽由于把热量放給冷却水因而变成了液体的凝結水。一部分蒸汽由汽輪机內抽出，供給用戶，以及用来加热凝汽器中所得到的凝結水。凝結水的加热在專門的加热器和除氧器18內进行。在除氧器內，将溶解在凝結水中的空气都驅除出去。在这以后，汽輪机的凝結水与补給水（由水处理設備供应，以补偿凝結水和蒸汽的损失）一起，靠給水泵21送到省煤器中去。这样就形成了封閉的循环回路，蒸汽和水沿着这一回路，在鍋炉房和汽机間之間流动。

利用吸风机14，将鍋炉机組內的烟气引出，送到烟囱16中，然后再由烟囱出来，排到大气中去。由于在烟气中往往含有大量飞灰，因而很容易造成吸风机的磨損，并使周围空气变脏，所以必須設法将这些飞灰捕除掉，为此，在烟气流經的通道上，装上了專門的除尘器13。

落在燃烧室內的灰渣及捕得的飞灰，靠除灰系統排到鍋炉房外面去。

第二章 燃料、燃料的成分及性质

2-1. 关于燃料的概念

凡是能与空气中的氧气发生迅速的氧化作用——燃烧，同时将大量热量放出的物质，都称为燃料。

但是只有儲藏量很大，易于开采，价格不高，且有可能广泛利用的燃料，才具有工业意义。

燃料是属于很复杂的有机化合物，在它的成分中包含有可燃的元素，以及其他許多不能燃烧的杂质。这些杂质对燃料性质的影响是非常大的。

所有目前已經知道的燃料，按照它們产生的根源，大致可以分成两大类：天然燃料和人工燃料。按照燃料的状态，每一类燃料又可以进一步分为固体的、液体的和气体的三种。在可燃矿物的利用方面，近代技术不只将燃料看作是取得热能的原料，而且把它看作是提炼貴重工业产品的原料，在冶金和化学工业方面，可燃矿物已成为其不可少的工质。

2-2. 燃料成分及其元素的評價

在專門的試驗室中，利用化学分析和技术分析，可以得出燃料的成分及质量。平均試样按燃料分批选取，在选取时，必須使它能真实地反映出整批燃料或燃料矿的性质和成分。选取平均試样时，应非常注意，并按照專門的操作規程进行。

由矿井或地面采得并供給用戶使用的燃料，称为工作燃料。在工作燃料中含有：碳（C）、氢（H）、燃烧时放出热量的揮发硫分（ S_d ）、内部杂质氧（O）和氮（N），以及外部杂质灰分（A）和水分（W）。所有上述燃料元素都按重量百分数給出。

水分。固体燃料中水分的变动范围很大：从5%到60%。液体燃料和气体燃料的湿度很小。燃料的水分分为外部（机动）水分 W_{au} （%）和内部（吸附）水分 W_{zp} （%）两种，合在一起称为工作水分

$$W^p = W_{au} + W_{zp} [\%].$$

燃料的外部水分，在室溫情况下自然干燥时就可以除掉。当燃料中的水蒸汽压力和周围大气中的水蒸汽分压力相等时，燃料的重量就停止减少。

内部水分靠毛細管作用貯存在燃料的孔隙內，只有用把燃料加热到103~105°C的干燥办法才能够去除掉。固体燃料中内部水分的含量在1~10%的范围内变动。然而，用这种方法求得的燃料总湿度往往小于燃料的实际水分，原因是在許多固体燃料中，还包含有結晶水分或化合水分，这类水分与燃料中的某些矿化物（粘土、硅酸盐）及有机物連在一起，只有在溫度約为800°C的时候，才能从燃料中驅除出去。

燃料中存在水分，对燃料的品质及鍋炉設備的工作來說，都是很不利的，原因是由于

存在水分，燃料中可燃物的含量就减少了，从而燃料燃烧时所放出的热量也降低了。除此以外，还有一部分热量消耗在燃料水分的蒸发上，与烟气中的水蒸汽一起，从锅炉设备排走，使锅炉效率降低。存在水分还使燃料点燃困难，并且由于水蒸汽的缘故，烟气的体积也增大了，这样一来，消耗在自锅炉设备内排出烟气上的（吸风机）电能数量就增加了。在排烟温度不高的情况下，烟气中的水分有发生凝结的危险，并可能使空气预热器的金属受热面发生腐蚀。

灰分。固体燃料中灰分变动的范围很广：从2%到60%。在液体燃料和气体燃料中，灰分则几乎不存在。

燃料中的灰分系各种矿化物的混合物，这些矿物是通过各种途径落到燃料中去的，并且大致可以分成三类。第一类灰分存在于燃料的原材料——树木中，由溶解在永久水分中的盐类形成，并且均匀地分布在其中。第二类灰分也是从外面进到燃料中去的，是靠地下水的作用，或是由于史前时期地壳起伏变动的结果。这两类灰分都不能在燃料开采时清除掉。

第三类灰分是燃料开采时附带落进去的岩石夹杂物，这类灰分在燃料选洗的过程中可以除掉。

把燃料试样盛在陶瓷的坩埚中，放到马弗炉内，在温度不超过800°C的情况下进行燃烧，一直到把余下的矿渣完全燃完为止，用这种方法求得燃料的灰分。由于在灰分中的矿物煅烧时会产生各种作用很复杂的物理-化学变化，因而用这种方法得出的燃料灰分并不是真实的灰分，可能比实际的灰分大，也可能比实际的灰分小。

譬如，当达到120°C时，石膏中的结晶水分就开始消失。在200°C及以上时，含在粘土一类质和硅酸盐内的所谓固有水分开始分离出来。当温度在800°C时，碱盐、氯化物和燃料灰分中的其他物质就发生挥发。同时碳酸镁和碳酸钙开始分解，放出碳酸化合物，挥发后，象水蒸汽一样，形成二氧化碳气体。

燃料灰分的最重要特性是：灰分开始变形温度 t_1 、软化温度 t_2 和熔化温度 t_3 的数值，取决于燃料灰分中夹杂的矿物。这些温度表明了该燃料灰分在燃烧过程中的活动情况。

灰分分难熔的和易熔的两种；后者在温度并不很高的情况下就变成了液体状态，并且在火焰燃烧的情况下，开始剧烈地粘在燃烧室内冷的受热面上；而在成层燃烧的情况下，则粘在炉篦上，使锅炉机组正常的工作情况遭到破坏。

当燃料中含有灰分时，燃料的价值就大大地降低了，并且在燃烧过程中还会产生很大的困难，特别是在燃烧多灰燃料的情况下。带到锅炉烟道中去的飞灰，会引起受热面磨损和积灰的现象，并使传热系数降低。

在锅炉机组内沉落下来的灰渣，需要有专门的设备把它们清除出去。

碳。碳是每一种燃料中最主要的组成元素之一，并且它不是游离地存在，而是与氢、氧、氮、硫一起构成复杂的有机化合物。纯碳燃烧时，放热量约为8000大卡/公斤，是燃料发热量的主要来源。在某些固体燃料中，碳的含量甚至达到了90~95%。

氢。燃料中另一个重要的组成元素是氢，它在固体燃料中的含量不大，平均为4~6%。在液体燃料中，氢的含量要高得多。根据发热的能力，氢几乎比碳要大3倍。一般认

为，氢气和燃料中的全部氧气都是連在一起的。在这种情况下，氢气燃烧时放出的热量，就要比氢气在游离的情况下燃烧时放出的热量小一些。因为在氢气和氧气化合成水时，每一份氢气需要八份氧气，所以在燃料中有 $\frac{O}{8}$ 数量的氢气与氧气連在一起，而其余的 $(H - \frac{O}{8})$ 〔%〕氢气則游离存在。

硫。除油頁岩以外，固体燃料中所含的硫分并不高。在硫燃烧时，有少量的热放出。

表 2-1 燃料成分的换算系数

燃料的已知质	燃料的未知质			
	有机质	可燃质	干燥质	工作质
有机质	—	$\frac{100 - S_K^z}{100}$	$\frac{100 - (S_K^c + A^c)}{100}$	$\frac{100 - (S_K^p + A^p + W^p)}{100}$
可燃质	$\frac{100}{100 - S_K^z}$	—	$\frac{100 - A^c}{100}$	$\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$
干燥质	$\frac{100}{100 - (S_K^c + A^c)}$	$\frac{100}{100 - A^c}$	—	$\frac{100 - W^p}{100}$
工作质	$\frac{100}{100 - (S_K^p + A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	—

在燃料中含有三种不同的硫：有机物中的硫 S_o 及黄铁矿中的 S_K ，合在一起，叫做可燃的挥发硫：

$$S_A = S_o + S_K [\%].$$

第三种是硫酸盐中所含的硫—— S_a ，这种硫由于已經氧化，所以不可能再放出热量，因此它是以矿化物的形式，与鉄和鈣化合在一起，成为燃料中的灰分。

燃料的总含硫量为：

$$S_{oo} = S_A + S_a [\%].$$

硫是燃料中一种非常不利的元素，因为硫燃烧后所生成的气体（硫酸酐），对操作运行人員和鍋炉机組的金属受热面來說，都是有害的。

氮和氧。它們都是燃料的内部杂质。氮是一种惰性气体；它在固体燃料中的含量不超过1~2%，并且当燃料燃烧时，以游离的状态分离出来。

燃料中氧的含量变动范围很大，有高达40%的。一般认为，燃料中所有的氧都与氢連接在一起，并且在燃料燃烧时形成水蒸汽。

在进行鍋炉设备技术計算时，以及在研究燃料性质、燃料生成根源和分类时，关于燃料几种质的概念用得是很普遍的。这些质的概念如下：

工作质：

$$C^p + H^p + S_x^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100\%;$$

干燥质，其中没有水分：

$$C^c + H^c + S_x^c + O^c + N^c + A^c = 100\%;$$

可燃质，其中没有外部杂质：

$$C^z + H^z + S_x^z + O^z + N^z = 100\%;$$

有机质，它与可燃质的差别仅在于黄铁矿的含硫量：

$$C^o + H^o + S_o^o + O^o + N^o = 100\%.$$

为了从燃料一种质的成分换算到另一种质的成分，应采用表 2-1 中所列的换算系数。

挥发分和焦炭。如果将干燥的固体燃料放在有盖的坩埚内，送入马弗炉中，在隔绝空气的情况下进行加热，则燃料中的挥发分将由坩埚盖下分离逸出，并在瞬间立即烧掉。剩余下来的留在坩埚中的固体部分，称为焦炭，由碳和煤灰组成。挥发分含量的百分数，一般是指燃料的可燃质来说。

在挥发的可燃物中包括有：氧、氮、挥发硫，一部分碳及各种碳氢化合物。燃料中挥发分的成分及含量，对燃料的起燃和燃烧影响很大。按照挥发分的含量，所有燃料可分为两类：有焰煤和贫煤。在确定某种燃料性质及生成根源时，可燃挥发分的含量是一个很重要的特征。

焦炭的性质对燃烧过程和该燃料在某些工业中的使用影响极大。焦炭的性质是按外部形状来进行判断的，一般可分为三类：粉状的，粘在一起的及结成焦状的。对应于焦炭的性质，固体燃料可分为结焦的及不结焦的两种。结焦的，焦炭具有很大的机械强度，所以能形成这种焦炭的燃料主要用在冶金工业方面，与此同时，不结焦的燃料则一般都算在蒸汽锅炉的燃烧室内燃烧。

2-3. 燃料的燃烧发热量

燃料的燃烧发热量是燃料最重要的热力特性之一。工作燃料的燃烧发热量分为两种：高位发热量 Q_H^p [大卡/公斤] 及低位发热量 Q_L^p [大卡/公斤]。高位发热量是指在燃料燃烧过程中分离出来的水蒸汽都凝结成水的情况下，每 1 公斤燃料完全燃烧时所放出的热量。低位发热量是指实际采用的计算数值，它与高位发热量的区别在于：燃料燃烧时所分解出来的水分，以水蒸汽的形式存在于燃烧产物中，为了形成水蒸汽，就要耗费掉一部分燃料的热量。在工作燃料的低位发热量与高位发热量之间，存在着下列关系：

$$Q_L^p = Q_H^p - 600 \left(\frac{9H^p + W^p}{100} \right) \text{ [大卡/公斤]}$$

或

$$Q_L^p = Q_H^p - 6(9H^p + W^p) \text{ [大卡/公斤]}, \quad (2-1)$$

式中 600 大卡/公斤——水分的蒸发潜热；

H^p 及 W^p ——燃料中氢和水分的百分数含量。

乘 9 表示：每燃烧 1 公斤氢气，由于与氧气化合，会产生 9 公斤的水。对燃料的其他质量来说，也存在着类似的关系式：

知道了空气重量和空气中氧气重量的关系 $\frac{L^0}{G_{O_2}} = \frac{100}{23.2}$ 以后, 就可以用下列的公式, 来求得每烧完 1 公斤燃料所需要的最少 (理论) 空气量 L^0 [公斤/公斤]:

$$L^0 = \frac{100 \times G_{O_2}}{23.2} \text{ [公斤/公斤]},$$

或在将公式(4-1)中的 G_{O_2} 代入后, 得到

$$L^0 = 0.115C^p + 0.345H^p + 0.043(S_p^p - O^p) \text{ [公斤/公斤]}. \quad (4-2)$$

因为一般空气量的测量都用体积表示, 所以根据空气的重度 $\gamma_B = 1.293$ 公斤/标准米³, 求出 1 公斤燃料完全燃烧所需要的最小空气体积:

$$V^0 = \frac{L^0}{\gamma_B} \text{ [标准米}^3\text{/公斤]},$$

由此得出

$$V^0 = 0.0889 \times C^p + 0.265 \times H^p + 0.0333(S_p^p - O^p) \text{ [标准米}^3\text{/公斤]}$$

或

$$V^0 = 0.0889(C^p + 0.375S_p^p) + 0.265H^p - 0.0333O^p \text{ [标准米}^3\text{/公斤]}. \quad (4-3)$$

在锅炉设备实际工作条件下, 供给理论需要的空气量, 不可能保证燃料得到完全燃烧, 原因是: 在现代的燃烧炉室内, 燃烧的情况还不够完善。因此, 为了保证燃料完全燃烧起见, 必须在燃烧室内送入稍多的空气量。

实际上需要的空气量 (V_d) 与理论需要的空气量之比, 叫做过剩空气系数, 用 α 表示:

$$\alpha = \frac{V_d}{V^0} > 1.$$

在这种情况下, 每烧完 1 公斤燃料实际需要的空气量为

$$V_d = \alpha V^0 \text{ 标准米}^3\text{/公斤}.$$

燃烧室内的过剩空气系数, 一般取决于燃料的种类, 燃烧的方法, 以及燃烧设备结构的完善性, 其数值变动的范围很大: $\alpha = 1.10 \sim 1.4$ 。

当烟气在烟道内流动的时候, 因为烟道内保持负压的缘故, 空气就从锅炉房内, 通过砖墙的不严密处漏入到烟道中去, 因此沿着锅炉设备的烟道, 过剩空气量是逐渐增加的。

2. 固体燃料和液体燃料燃烧产物的成分及数量

在带有过剩空气、不完全燃烧的情况下, 每燃烧 1 公斤燃料时, 烟气 (以体积表示) 的组成部分如下: 二氧化碳及一氧化碳气体 V_{CO_2} 及 V_{CO} , 由碳燃烧生成; 二氧化硫 V_{SO_2} , 由硫燃烧生成; 过剩的氧气 $V_{O_2^A}$, 这部分氧气在燃料燃烧时没有利用; 氮 V_{N_2} , 随空气带入并由燃料中以游离状态分离出来; 水蒸汽 V_{H_2O} , 由氢气燃烧及燃料中的水分蒸发产生, 也有随湿空气带入的。

因此, 每 1 公斤燃料燃烧生成的全部烟气体积等于:

$$V_z = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{O_2^A} + V_{N_2} + V_{H_2O} \text{ [标准米}^3\text{/公斤]},$$

或用体积百分数表示:

$m=0.95\sim 1.01$ ●——修正系数，取决于燃料的种类。

然而，按經驗公式計算，只能得出近似的发热量大小，原因是这些公式不可能包括燃料燃烧时所发生的全部复杂的化学过程，而且燃料的本身就是非常复杂的有机物組成体。

此外，有机化合物的燃烧放热量并不单独取决于有机物中可燃元素（碳，氢）的含量，而且还与这些元素的結合形式及参加到这些化合物中去的其他元素有关。

測定燃料主要化学元素——碳及氢的准确性，比測热計的准确性要差得多。

与固体燃料及液体燃料不同，气体燃料的本身是各种可燃气体和不可燃气体的机械混合物。因此，气体燃料的发热量，可以按 1 标准米³气体中各种組成气体（按体积百分数計）燃烧时所放出的热量計算。

● 参考Г.Ф.克諾烈著的“鍋炉燃烧过程”一书，苏联国立动力出版社1951年版。

第三章 燃料的生成及分类

3-1. 固体燃料的生成

所有固体燃料都有共同的生成基础，一般可分为三类：腐植质的、由藻类所生成的及混合的。

腐植质的燃料基本上是由多細胞的木本植物所生成，这种植物死后，在地面上腐烂，形成了腐植质（希腊語称为腐植土）。

第二类燃料系由单細胞的藻类浮游物生成，这种藻类大量地繁殖在很久以前曾經是水池的地方。这些水藻死了以后，逐漸在水池的底部腐烂，在空气缺乏的条件下，形成了污浆，俗称泥藻。

然而，最普遍的是混合生成的固体燃料，在生成这种燃料的过程中，木本植物和藻类一起，都参加在内。

巴东尼在自己的假說中，对由原始植物变成最后燃料的变化过程，作了最完整的解释。他把整个变化过程分成三个阶段：腐烂、煤化及增碳。腐烂过程发生在地面上、而且是在与周围大气中的氧、大量的細菌和微生物发生作用的情况下进行的。这一过程的结果是沒有任何固体的碳素化合物留下来。

煤化过程发生在空气中氧气不足的情况下，这一过程的结果是由沉积的植物生成含碳量較高的物质，主要成分是由碳、氢、氧合成的有机化合物——腐植质。

原料的增碳过程发生在缺乏氧气的情况下，具体的条件是沉在水里或埋在地下。在这种条件下，产生緩慢的《造氧》生化反应过程，也就是菌化过程。由于发生这种过程，以致原始材料中的碳分增加，而氧的含量却有所下降。

由原始材料变成現代燃料的这一复杂而又漫长的过程，都是在温度和压力的作用下发生的，当它由于地层起伏的造山运动而被埋到地下以后，压力和温度就增高了。

燃料的形成分为三个阶段：泥煤阶段，褐煤阶段及烟煤阶段。泥煤阶段的特征是生成泥煤，从現代科学观点來說，这是煤生成时的最初阶段。褐煤阶段的特征是生成褐煤，这是一种由土色轉黑色的比較紧密的物质。

第三个阶段——烟煤阶段的特征，是尚未化成烟煤的褐煤繼續发生轉化，变成烟煤。但是，在造山过程中被埋在地球表层下的一部分褐煤，則仍停留在褐煤阶段，不再轉化，原因是不再发生增碳过程。烟煤变化的最后阶段是生成无烟煤，在这一过程中，含碳量增加到了极限的数值，高达95~96%。

因此，所有生成的固体燃料，相互之間的差别仅在于化学成分中碳素的增加，換句話說，也就是仅在于原材料化学轉化的程度不同而已。

原始植物——树木，是由各种复杂的有机物所组成的，这些有机化合物在成煤过程中各起着不同的变化。

组成树木的主要物质——纤维素，约占70%，然而在经过化学反应及生化反应过程以后，大部分纤维素都遭到分化，几乎全变为气体及溶解在水里的物质。树木的其余组成部分（约占30%）为木质素，属于碳水化合物，含有少量的氢。

按照菲赛尔和什拉特尔的见解，认为木质素是一种很稳定的物质，具有很强的抵抗化学作用和生化作用的能力，这种化学作用和生化作用，在植物死后是很容易发生的。根据这种特点，可以认为：木质素与植物油、木蜡、树脂一起是形成煤的主要物质。

统一分类是研究各种燃料及其性质时极为重要的问题。在各种已知的分类方法中，值得注意的是格留涅尔提出的适用于欧洲烟煤的分类法，以及Г.Л.斯塔特尼可夫及Ф.Э.捷尔仁斯基全苏热工研究所提出的适用于苏联燃料的分类法。

例如，Г.Л.斯塔特尼可夫教授把所有的固体燃料划分为四类：1) 纯泥藻质燃料；2) 纯腐植质燃料；3) 泥藻-腐植质燃料；4) 腐植质-泥藻质燃料。每一大类又分为三小类：泥煤、褐煤及烟煤。每一小类中，按照性能的不同又分别用各种牌号表示。

3-2. 固 体 燃 料

1. 木 质 燃 料

在目前来说，在锅炉设备中燃烧木质燃料的例子很少，而且那些也仅是用在小型设备上。原因是建筑部门和各种化学工业都需要用木材来作原料。

所有木材加工工业的下脚料和农业方面的柴草（谷皮、亚麻皮等），都是木质燃料。木柴当燃料使用的优点是灰少、无硫、可燃的挥发分含量很大。木柴的水分很高，达60%，所以它的发热量很低， $Q_d^* = 2500 \sim 3000$ 大卡/公斤。木质燃料的特性列在表3-1中。

2. 泥 煤

按化学增长的情况来说，泥煤是一种最年轻的矿产固体燃料。泥煤质地很松，含有大量的纤维质，颜色由土色到褐色，甚至黑色。按照泥煤所在位置的深度，可以分为：上面的、中间的及下面的。按照目前苏联机械化开采泥煤的方法，分为机械制模（块状）的泥煤，水力开采的泥煤和凿切泥煤。

按前面两种开采方法得到的泥煤，都呈砖块形状。在采用第三种方法时，得到的则是小块泥煤。新开采出来的泥煤含水量达90%，因此需在产地进行长期自然干燥，干燥后，泥煤的含水量降低到40~50%。由于水分很大，泥煤的发热量很低， $Q_d^* = 2500 \sim 2000$ 大卡/公斤。

泥煤中的灰分（指干燥质而言）在3~10%之间变动，埋藏深度愈大，灰分含量就愈高。可燃质的挥发分稍低于木柴，约为70%。泥煤的特性列在表3-1中。

3. 原 煤

燃烧用的煤共有三种：褐煤，烟煤及无烟煤。某些地方的煤露在地面上，此时，可用

挖掘机进行露天开采。在另外的地方，煤都是埋在很深的地下，有时深达几百米。在这种情况下，就只有采取地下开采的办法，为此就需要有专门的矿井。煤层厚度变动较大，从几米一直到几十米。开采出来的煤必须经过洗选，并把岩石除掉。

褐 煤

苏联有许多地方产褐煤，其中最主要的是莫斯科近郊，齐略宾和鲍郭斯洛夫矿区。褐煤属于地方性的低质燃料，由于灰分很大（ $A^c=20\sim30\%$ ）和水分很高（ $W^p=30\sim40\%$ ）的缘故，燃烧相当困难。褐煤的发热量不超过 $Q_u^p=2500\sim4000$ 大卡/公斤。当褐煤中含硫时，褐煤的质量就大大下降。

按照化学增长的情况来说，褐煤是属于年轻的燃料，因此它的强度很差，不结实，贮藏时容易引起风化和自燃。对可燃质而言，挥发分含量高达45%。褐煤比泥煤要紧密得多，颜色由褐转黑。

烟 煤

烟煤比其他的煤更早得到广泛采用，不仅用作燃料，而且还用来作为冶金工业和化学炼焦工业的原料。原因是烟煤的质量很高，具有很高的发热量， $Q_u^p=5000\sim6500$ 大卡/公斤，灰分和水分都不高， $A^c=15\sim20\%$ ， $W^p=4\sim12\%$ 。烟煤有很高的机械强度，结构很紧密，因此不容易风化和自燃。烟煤最特殊的优点是可以炼焦，因此烟煤被广泛地用在冶金工业上。

苏联的烟煤产地主要集中在下列地区：顿巴斯、库兹涅茨、卡拉岗达、南雅库特和彼巧尔。

烟煤是由腐植质和泥藻混合生成的，属于腐植质-泥藻质煤或泥藻-腐植质煤。按照外表颜色和煤块断裂面的特征，烟煤可分为下列四种：

1. 发光的，呈乌黑色，具有相当光亮的色泽。
2. 不发光的，呈暗灰色，无光泽。
3. 纤维状的，呈深黑色，并保留有木料的结构组织。
4. 分层的，带有很明显的夹层，在断面上可以看到许多条发光和不发光的带层。

4. 无 烟 煤

无烟煤是增碳过程已几乎达到极限情况下的煤，按其化学增长情况，它是属于最古老的煤种。无烟煤具有很固定的成分。

因此，无烟煤只能用块粒大小进行分类，块粒大小系根据开采后经过相应处理的煤而定。

无烟煤的特点是挥发分含量很少，在8~5%的范围内，因此它很难着火，并且烧得很慢，燃烧时产生很弱的青蓝色火焰，不冒烟。无烟煤几乎全由碳组成，在可燃质中，碳的含量达到了95~96%，但由于同时减少了氢的含量，因此无烟煤的发热量比烟煤要低一些。

无烟煤含有很少的水分及灰分，具有非常大的机械强度和强烈的光泽。无烟煤不論保存多少時間都不会发生风化和自燃現象。褐煤、烟煤及无烟煤的特性列在表3-1中。

5. 可燃頁岩

油頁岩按本身特性來說，与上述各种固体燃料有很大的不同，上述燃料的規律对油頁岩來說是不适用的。原因是油頁岩的生成系腐植质（由浮游物形成）沉淀的結果。在缺乏空气的条件下，大批死去的浮游物发生分解的时候，腐植质中的有机物就逐漸汇集在一起，其中既包括碳分，也包括氢气在內。由于造山运动的結果，在这些矿床中充滿了其他的夹杂矿物，并在高溫与高压的作用下，形成了半有机质和半矿物质的物质，这种物质就叫做油頁岩。

苏联主要的油頁岩矿分布在古比雪夫、烏里揚諾夫和列宁格勒等地区，以及爱沙尼亚苏維埃社会主义共和国。油頁岩是很低級的固体燃料。在油頁岩中，灰分的含量达到了70%，其中很大一部分是粘土、石英砂、碳酸鈣和碳酸鎂。碳酸鈣和碳酸鎂在油頁岩燃烧的时候会发生分解，放出碳酸盐中的二氧化碳 CO_2 。在油頁岩中，含有大量的硫（ $S_a\% = 10 \sim 14\%$ ），可燃质的揮发分含量高达80%。油頁岩的发热量很低，不超过 $Q_u^p = 1500 \sim 2000$ 大卡/公斤。

3-3. 液体燃料

天然的液体燃料——石油，在很早以前就已經知道，然而一直到十九世紀中叶，石油才被用在工业上。

石油是一种油质流体，顏色不一，由暗灰色直到淡黄色。各处开采所得到的石油，都是各种液体有机化合物的混合物，主要成分为一些分子量不同和組織基体不一的碳氢化合物。除了碳氢化合物以外，在石油中也还有液体的氧、硫和氮的化合物。根据碳氢化合物的含量和种类，石油分为烷基的、环烷基的和苯基的三类。

石油产地遍布全世界。苏联的石油产地为巴庫、格罗茲內、爱姆伯、彼尔米、馬伊考巴、波沃尔日也等。

各产区所产的石油，在质量方面，彼此相差很大，这样就引起了各种各样关于石油生成根源的假說。目前最流行的，是恩格列尔所提出的关于石油是由动物生成的学說，以及不少学者（其中包括斯大特尼可夫）所提出的关于石油是由浮游植物生成的学說。后一学說的优点，是在所有可燃的矿物之間建立了完整的起源体系。

原油一般不用作燃料，而是先进行加工处理，由原油中提取各种宝貴的产品，如苯、汽油、輕油、各种油及其他产物。石油分餾后余下的产物——重油，則用作鍋炉的燃料。

重油是一种优质燃料，因为在重油中几乎沒有灰分及水分，并且发热量很高， $Q_u^p = 9300 \sim 10000$ 大卡/公斤。重油的特征是碳和氢的含量很高。

在某些重油中含有硫或石蜡，这类杂物会降低重油的质量。重油的特性数据列在表3-1中。