

高等学校交流讲义

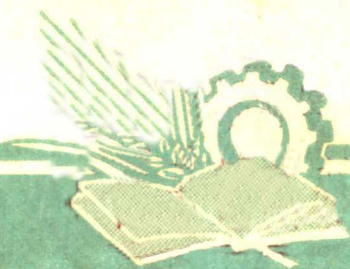
鍋 炉 設 备

上 册

范从振 章臣樾 周强太 合編

南京工学院发电厂热力設備教研組校訂

只限学校内部使用



中国工业出版社

本书系根据水利电力部召开的高等教材工作会议的决定在原有讲义的基础上进行编写的，分上下两册出版。上册包括锅炉用燃料，燃烧理论的基本概念及燃烧设备、煤粉设备、自然循环锅炉的结构及锅炉的对流受热面等部分。本书可作为高等院校发电厂热能动力装置专业锅炉设备课程的教学用书，也可供从事锅炉方面工作的同志参考。

锅 炉 设 备

上 册

范从振 章臣樾 周强太 合编
南京工学院发电厂热力设备教研组校订

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南街)
中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)
(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)
中国工业出版社第二印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^{5/8}$ ·插页2·字数300,000
1961年8月北京第一版·1962年5月北京第三次印刷
印数3,298—6,397·定价(10-6)1.60元

*

统一书号: K15165·585(水电-79)

前 言

本书系根据1961年3月水利电力部在武汉召开的高等学校水利电力类教材工作会议的决定，由我院负责编写的。

本书以我院原有锅炉设备讲义为基础，并根据1959年指导性教学大纲的精神进行修改，作为发电厂热能动力装置专业锅炉设备教学用书，也可作为工业热能专业和锅炉制造专业有关课程的参考书。对于工业热能专业，当还缺乏更加适当的工业企业锅炉设备教材时，也可以作为临时教学用书，但在讲授时，可根据专业需要作适当的增减。

书中考虑到关于锅炉辅助设备的内容将会在热工测量及仪表、泵与风机、热力发电厂等课程中作比较详细的叙述，故这方面的篇幅已适当减少。

参加本书上册编写的同志有范从振、章臣樾和周强太。第三章、第四章、第七章和第八章由范从振编写，第五章、第六章和第九章由章臣樾编写，第二章、第十章和第十一章由周强太编写。撒应祿同志也参加了部分章节的编写工作。

原锅炉设备讲义吸收了多年来该门课程的教学经验，同时也包含有1960年和1961年毕业的本专业部分同学的大量劳动成果。在本书交付出版时，徐海泉同志作了大量插图等工作。我们特此向他们表示深切的谢意。

由于水平所限及时间仓促，缺点在所难免，可能亦有错误，希兄弟院校师生和读者批评指教。

南京工学院发电厂热力设备教研组

1961年5月

目 录

前 言

第一章 緒 論	5
第一节 概述	5
第二节 鍋炉设备的主要部件和輔助設備	6
第三节 鍋炉的基本特性	9
第二章 燃料及燃燒計算	10
第一节 燃料的化学成分	10
第二节 燃料的特性	14
第三节 固体燃料的分类	18
第四节 液体燃料和气体燃料	22
第五节 固体和液体燃料的燃燒計算	23
第六节 气体燃料的燃燒計算	31
第七节 燃燒产物的焓	33
第三章 鍋炉机组热平衡	35
第一节 热平衡方程式	35
第二节 排烟热損失	37
第三节 化学不完全燃燒热損失	38
第四节 机械不完全燃燒热損失	39
第五节 散热損失	41
第六节 灰渣带走的物理热損失	42
第七节 鍋炉机组热效率和燃料耗量	43
第八节 鍋炉机组热平衡試驗	43
第四章 炉内燃燒过程	44
第一节 炉子的作用和計算特点	44
第二节 主要燃燒方式	45
第三节 燃料的干燥和加热	49
第四节 燃料燃燒过程	51
第五节 完全燃燒的良好条件	53
第六节 灰渣的形成	54
第五章 层燃炉	55
第一节 燃料在炉竈上的燃燒	55
第二节 炉膛空間內的燃燒	59
第三节 人工炉	60
第四节 拋煤机加煤炉	65
第五节 鏈条炉竈	67
第六节 鏈条炉竈上煤层燃燒区域的分布	71
第七节 鏈条炉的炉膛	73
第八节 燃料性质对鏈条炉工作的影响	76

第九节 播散加煤链条炉	78
第十节 沸腾燃烧炉	80
第十一节 固态排渣旋风预燃炉	81
第六章 煤粉制备	82
第一节 煤粉的性质和煤的可磨性	82
第二节 各种磨煤机的结构和特性	85
第三节 制粉系统	95
第四节 制粉系统的部件	99
第五节 制粉系统的热平衡	102
第七章 室燃炉	105
第一节 煤粉的燃烧	105
第二节 煤粉炉的结渣	107
第三节 煤粉喷燃器	109
第四节 喷燃器的布置和炉子设计	113
第五节 用竖井磨的煤粉炉	116
第六节 气体燃料的燃烧设备	119
第七节 点火和助燃设备	123
第八章 液态排渣炉和旋风炉	125
第一节 液态排渣炉基本概念	125
第二节 液态排渣炉的型式	127
第三节 液态排渣炉的喷燃器	129
第四节 燃烧室	132
第五节 液态排渣旋风炉	134
第九章 自然循环锅炉的发展	139
第一节 一般说明	139
第二节 火管锅炉	140
第三节 水管锅炉的发展和分类	142
第四节 近代水冷壁汽鼓锅炉	145
第五节 高压和超高压大容量锅炉	149
第十章 蒸汽过热器	153
第一节 一般说明	153
第二节 蒸汽过热器的热偏差	154
第三节 对流过热器	160
第四节 辐射式和半辐射式过热器	162
第五节 过热器的汽温特性和布置	163
第六节 过热蒸汽温度的调节	165
第十一章 尾部受热面	171
第一节 一般说明	171
第二节 省煤器的结构	172
第三节 省煤器连接系统	178
第四节 空气预热器的结构	179
第五节 受热面的积灰	186

第六节 受热面的飞灰磨损	189
--------------------	-----

第七节 低温受热面烟气侧的腐蚀	192
-----------------------	-----

附表

附表 1 锅炉机组各烟道的最大许可漏风量	196
----------------------------	-----

附表 2 竖井磨闭式制粉系统的平均漏风量	196
----------------------------	-----

附表 3 筒型球磨中间貯仓制闭式制粉系统的平均漏风量	196
----------------------------------	-----

附表 4 层燃机械炉和半机械炉的计算特性(按苏联煤的资料)	197
-------------------------------------	-----

附表 5 闭式制粉系统固态排渣煤粉炉的计算特性(按苏联煤的资料)	198
--	-----

附表 6 液态排渣炉的计算特性(按苏联煤的资料)	198
--------------------------------	-----

复习提要	199
------------	-----

第一章 緒 論

第一节 概 述

蒸汽鍋炉的作用是把燃料的化学能轉变为热能,进一步将热能傳遞給水,以产生蒸汽。蒸汽可直接供应工业生产过程中加热或人民生活中取暖的需要,也可用以推动蒸汽原动机以产生机械能。蒸汽原动机的机械能可以直接用于工业生产,也可用以带动发电机,而轉变为工业、农业、交通运输业和日常生活中所需的电能。

现代的动力,主要是由电站集中供应的,动力中以电能的輸送最为有效和方便。工、农业的发展和人民生活水平的提高在一定程度上取决于电气化的程度,所以,电力工业在整个工业发展过程中起着先行的作用。

我国电力工业,在解放以前的情况是十分落后的,1949年全国发电设备总容量只有184万瓩,几乎全是低压和中压的机组,并且大多陈旧失修;鍋炉效率也很低,煤粉炉在80~85%之間,鏈条炉在65~75%之間,因此电厂煤耗很高,全国平均为1.02公斤/瓩·小时,全年发电量只有43亿瓩·小时。解放以后,經過了三年的国民經济恢复期和第一个五年計划,到1957年,我国电力工业無論在生产和基本建設方面均获得了巨大的成就,发电设备总容量到达464万瓩,其中还有相当数量的高压高温机组。同时由于运行技术的进步,煤粉炉的效率提高到87~92%,鏈条炉则为80~90%,平均煤耗仅0.59公斤/瓩·小时,全年发电量为193亿瓩·小时。

1958年,在党的鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义总路綫的光輝照耀下,电力工业的生产和其他工、农业生产一样,获得了飞跃的发展。1959年,在党的持續跃进的偉大号召下,电力工业生产也出現了持續跃进的局面,提前三年完成了第二个五年計划所規定的生产指标,使我国全年发电量由1949年占世界的第24位跃居到第9位。鍋炉运行技术也有了很大提高,电厂的平均煤耗比解放前降低了大約一半,某些电厂的煤耗已接近世界先进水平。

电力工业生产的迅速发展,促进了鍋炉制造工业的飞跃发展。解放前,在帝国主义压榨、掠夺和封建买办的反动統治下,可以說,根本沒有鍋炉制造工业,仅有的极少数手工业作坊,只能修配和仿造极小型的鍋炉,而电厂用的动力鍋炉,都是从英、美、日等国家进口。解放后,在国民經济恢复时期,党就規划了鍋炉制造工业的建設。第一个五年計划期間,在苏联等兄弟国家的帮助下,我国就已建成了现代化的鍋炉制造厂。1958年以来,全国各地又建立了許多大、中、小型的鍋炉制造厂。现代化鍋炉厂的建立,使我国鍋炉制造业的面貌发生了根本的变化。在我国第一个五年計划期間,我們就已經生产出40~120吨/小时的鏈条炉和煤粉炉。大跃进的1958年,国产第一台高压、高温鍋炉,即与国产5万瓩汽輪发电机配套的230吨/小时鍋炉誕生了。目前,容量更大、型式更新的鍋炉已經或正在設計和制造。

近年来,热力发电设备的发展异常迅速,高压、高温、大容量的设备已經广泛采用。超高参数和超临界参数以及蒸发量在500吨/小时以上的巨型鍋炉日益增多;蒸发量接近

2000吨/小时的鍋炉也将要生产出来；新型的旋风炉和直流鍋炉在电厂鍋炉中所占的比重逐渐增加。因此，在鍋炉制造业方面，我們的任务还是很艰巨的。

电厂所生产的电能是直接为其他工业部門的生产、农业生产和人民生活服务的。电能生产是否安全，直接影响工、农业生产的发展，在火力发电厂中，蒸汽鍋炉、汽輪机和发电机三者为有机的組合。三者中任一设备工作的好坏，均将影响到整个电厂的工作。因此，对于电厂鍋炉的第一个要求，是保証安全可靠地生产(运行)。

其次，在生产过程中鍋炉将消耗大量燃料。組織鍋炉的經濟运行，千方百计地設法节约燃燒也是一个极为重要的任务。

既然蒸汽鍋炉消耗大量燃料，而燃料的用途又非常广泛，且其他一些工业部門(如冶金工业、化学工业等)对于燃料在质量上提出比較高的要求，因此，改进鍋炉燃燒技术、設法利用低級燃料、节约优质燃料以供应其他工业部門，是动力工作者义不容辞的光荣任务。

我們偉大的祖国，工、农业生产的面貌日新月异，对电力工业生产发展的要求也一日比一日高。迅速发展电力工业，固然需要建設新的电厂，但是，挖掘現有设备的潛力，在安全生产的条件下提高设备的出力，也是十分重要的。

为了保証鍋炉的安全和經濟运行，以及減輕司炉的劳动强度，必須不断改进鍋炉的运行技术，使鍋炉的运行向机械化、自动化的方向发展。

綜上所述，从事于热能动力工作者必須具备有关鍋炉设备方面的巩固的理論基础和丰富的实际知識，才能解决鍋炉在生产实践和科学发展中所提出的任务。

第二节 鍋炉设备的主要部件和輔助设备

鍋炉是利用燃料燃燒所放出的热量，以获得一定压力和温度的蒸汽的设备。所以鍋炉设备必須完成下列任务：

(1) 將必需数量的燃料和相应的空气送入炉內燃燒，燃燒生成的高温烟气在炉內和后部烟道中放出热量而逐渐冷却，低温烟气最后由烟囱排出；燃料燃燒所生成的灰渣也要排到鍋炉设备以外。

(2) 將工质(給水)送入鍋炉內通过受热面吸收烟气放出的热量，水被加热到饱和温度而汽化，再將所产生的饱和蒸汽繼續加热，使之成为过热蒸汽，最后被引出应用。

以上所提到的炉子、烟道、受热面以及鍋炉的炉墙和构架等部件的綜合，称为鍋炉机組。此外，鍋炉还应该具备供应空气的送风机，排除烟气的引风机，和燃料的制备系統等輔助设备。鍋炉机組及其輔助设备总称为鍋炉设备。

近代鍋炉设备是很庞大而复杂的，例如对于5万瓩的汽輪机，每小时約需供应40~140大气压、450~540°C的蒸汽200~250吨。与这汽輪机配套的鍋炉每小时就需要200多吨的給水，25~50吨的燃料和200,000标准米³左右的空气。这种鍋炉本身高度达30~40米，寬度与深度約为10~20米，金属件重量达1000吨以上。

为了简单說明鍋炉主要部件的作用，今以一个燃燒煤粉的鍋炉设备的原理图(图1-1)为例加以叙述。

一、炉子

事先在磨煤机內磨成的煤粉用空气吹送經噴燃器进入炉膛(燃燒室)，煤粉是在炉

膛内悬空燃烧的，这样燃烧方式称为悬浮燃烧或室燃，而这种炉子称为室燃炉。煤以粉状燃烧的目的在于增加与空气的接触面，使燃烧强烈而有效。

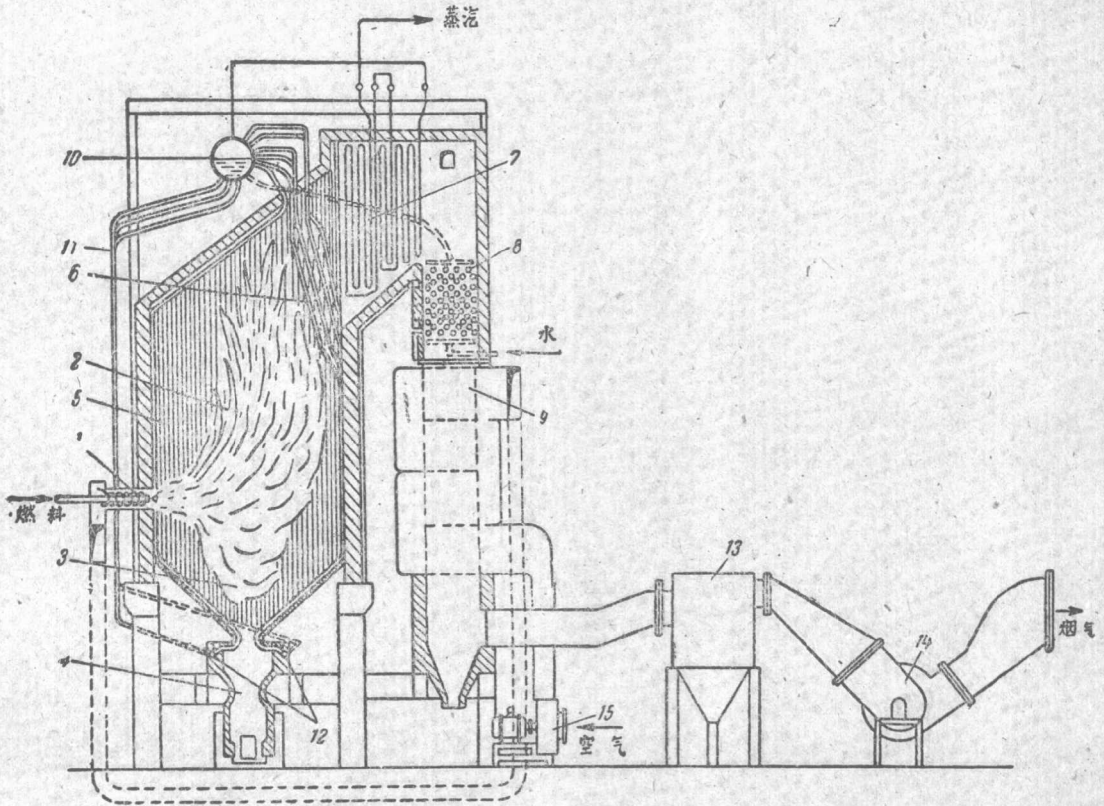


图 1-1 锅炉设备原理图

1—喷燃器；2—炉膛；3—冷灰斗；4—灰渣斗；5—水冷壁；6—防渣管；7—过热器；8—省煤器；9—空气预热器；10—汽鼓；11—下降管；12—联箱；13—除尘器；14—引风机；15—送风机。

煤粉炉里燃料燃尽后所生成的灰粒很细小，故大部由烟气经烟道带出，并被装在锅炉与烟囱之间的除尘器收集下来，通常只有少量极细的灰粒能通过除尘器由烟囱排出，另一部分较大的灰粒则在炉内沉下。因为炉膛火焰中心最高温度可达 $1500 \sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，灰粒均成熔化状态，但在经由炉膛下部温度较低的冷灰斗的沉降过程中，即被冷却而粒化，故落入灰渣斗的已是固态灰渣，这种炉子称为固态排渣炉。另一种炉子的下部没有冷灰斗，相反的常设法在炉底部分维持相当高的温度，使落下灰渣保持熔化状态，并能自动流出，这种炉子就称为液态排渣炉。

另一种常用的燃烧煤块和煤粒的炉子，就必须有炉篦，大部燃料均在炉篦上燃烧，这种炉子称为层燃炉或篦炉。

二、水冷壁

因为炉内温度很高，所以炉膛壁上可布置很多管子作为辐射受热面，这称为水冷壁；锅炉产生的全部或绝大部分的蒸汽是在水冷壁管内产生的，所以其中有水亦有汽。水冷壁的另一个作用是保护炉墙，使不会因温度过高而损坏。

三、汽鼓

水冷壁管里的汽水混合物上升进入汽鼓，汽鼓为长圆筒形，其直径约为1.5~1.8米，长度与锅炉宽度相仿，蒸汽与水即在汽鼓中分离。汽鼓下部的水由于比重较大，经炉墙外的下降管进入水冷壁的下联箱。这样，下降管中的水向下流，水冷壁管中的汽水混合物向上流，自然地形成了一定的循环路线。这种锅炉称为自然循环锅炉，或汽鼓式锅炉。实际上，有些锅炉虽有汽鼓，但为了提高循环可靠性，在下联箱前加入循环水泵，这种锅炉称为强迫循环锅炉。

另一种锅炉，水借给水泵压力顺序通过锅炉受热面，一次将水全部汽化并过热至规定的温度，最后输出。这种锅炉称为直流锅炉。直流锅炉不需要汽鼓，适用于高参数。显然，当蒸汽参数超过临界值时，就只能采用直流锅炉而不能再应用自然循环锅炉了。

四、防渣管

当炉膛中的烟气上升到炉膛出口时，其温度约降到1000~1200°C之间，烟气中所带熔化或软化的灰粒又重新凝固。但为了避免仍有粘性的灰粒粘结对流受热面上形成结渣而堵塞通道，将炉膛后墙密集敷设的水冷壁管在炉膛出口处拉稀成3~4排。这样排列较稀的管子，对燃烧产物有冷却作用但不易粘结灰渣，故称为防渣管或垂彩管。

五、过热器

烟气离开炉膛经过防渣管后进入对流传热区，这里通常布置许多密集并行蛇形弯管所组成的过热器。汽鼓送出来的饱和蒸汽经过它被加热到规定的温度，然后进入新蒸汽管供应外界需要。

六、省煤器

省煤器亦是由许多并行的蛇形管组成，由给水泵打来的给水首先经过它，预先提高温度，有时也产生少量蒸汽，然后进入汽鼓。

七、空气预热器

空气预热器通常布置在锅炉出口，亦即烟气温度最低的区域，与省煤器同时被称为尾部受热面。供应燃料预先干燥和燃烧用的空气，经过空气预热器预热，这样既可利用将要排出烟气的热量，又可改善燃烧。目前动力锅炉较常采用的空气预热器是由很多直立的管子做成，烟气自上而下由管内通过，空气则在管外横向流过。最后离开锅炉的排烟温度约在100~200°C之间。

八、炉墙和钢架

为了使火焰和烟气与外界大气隔绝，所以无论炉膛或烟道均须用炉墙密封起来；炉墙同时也起保温的作用；炉墙的材料是耐火砖和保温砖，或是相应的塑料。炉墙外就是钢架，用以支架锅炉受热面、汽鼓和炉墙等全部构件。

九、送风机和引风机

通常炉膛内维持的压力略低于大气压，但是进入炉膛的空气除了有一定的速度外，还要克服空气预热器，风道和喷燃器等的阻力，所以就要用送风机。离开炉膛的烟气要克服各种对流受热面、烟道、除尘器和烟囱等的阻力才能排到大气中，这个压头是由引风机产生的。

第三节 锅炉的基本特性

一、锅炉的规范

锅炉的作用是产生一定数量和参数的蒸汽。锅炉的规范是以单位时间内蒸汽的产量和所产生蒸汽的参数来表示的。锅炉每小时所产生蒸汽的吨数称为蒸发量(吨/小时),我国电厂目前应用最多的是65吨/小时至230吨/小时的锅炉。蒸发量有所谓额定蒸发量和经济蒸发量,前者是在长时期内能维持正常工作的最大蒸发量,也称作最大长期蒸发量;后者是指锅炉机组具有最高效率时的蒸发量。一般锅炉的经济蒸发量约为额定蒸发量的75~80%。锅炉产生蒸汽的参数是指锅炉出口处(即过热器出口)蒸汽额定的压力(大气压)和温度(°C)。蒸汽压力不超过~16大气压的称为低压锅炉,其蒸汽温度一般不超过~400°C;汽压为20~60大气压,汽温为400~450°C的锅炉,称为中压锅炉;汽压为60~140大气压,汽温为460~540°C时称为高压锅炉;蒸汽参数再高时称为超高压锅炉;超过临界参数的称为超临界锅炉。我国现在采用苏联的标准,中压锅炉的标准参数为40大气压和450°C,高压锅炉的标准参数为100大气压和510°C(或540°C),其它参数尚未定标准。

二、锅炉的安全性和经济性

无论从工业生产或人民生活的角度来看,电厂的安全生产是十分重要的,所以也要求锅炉能长期安全工作。在目前的水平上,通常要求锅炉能连续工作100昼夜以上。另一方面,因为锅炉是高温高压的大型设备,如果发生爆炸或破裂等事故,是十分危险的,所以要特别注意这方面的安全。

锅炉机组的热经济性通常是用它的总效率 η_{ka}^p 来表示的,这个效率就是锅炉每小时有效利用热量与同时期内所消耗燃料的全部热量的比值。假定锅炉除了供应新汽外,没有其它水或汽的排出或损失,则其总效率可用以下简单的公式来表示:

$$\eta_{ka}^p = \frac{D(i_{ne} - i_{ng})}{BQ_n^p} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 D ——每小时供应蒸汽量,公斤/小时;

i_{ne} 和 i_{ng} ——供应新汽和输入给水的焓,千卡/公斤;

B ——每小时消耗的燃料量,公斤/小时(固体或液体燃料)或标准米³/小时(气体燃料);

Q_n^p ——燃料低发热量,千卡/公斤(对于气体燃料用 Q_n^p 千卡/标准米³)。

三、锅炉方面的投资

锅炉本身的投资在很大程度上决定于制造时所耗用的金属量。在相同条件下,锅炉容量愈大则耗用的金属就愈多,所谓金属使用率是指每小时产生一吨蒸汽所用金属的吨数,这可以作为锅炉制造成本的一个重要指标。锅炉所用金属主要是低碳钢,参数较高的锅炉还要用部分的高温合金钢,它的价格比碳钢贵得多,所以如把合金钢的,使用率分开来表示则更清楚。此外锅炉本身所耗的耐火材料、绝热材料以及制造运输和安装等费用也应考虑在投资内。

锅炉结构的紧凑性对厂房建筑费用影响很大,锅炉本身所要求的辅助设备对投资亦影响很大。这些问题在设计锅炉时均应仔细考虑。

第二章 燃料及燃燒計算

所謂燃料，是指在燃燒過程中能放出大量熱量的物質。在工程上，把燃料理解為加熱到一定溫度能與氧發生強熱反應，並放出大量熱量的碳化物和碳氫化合物。

一切燃料，按其狀態可分為固體燃料、液體燃料和氣體燃料三種；而按其獲得方法區分，則可分為天然燃料和人工燃料。人工燃料是經過一定處理過程的燃料。

不同狀態的燃料，都有其相應的天然燃料和人工燃料，如表2-1所示。

表2-1 燃料分類表

	天 然 燃 料	人 工 燃 料
固體燃料	木柴、泥煤、褐煤、煙煤、无烟煤、頁岩……	木炭、焦炭、泥煤磚、煤粉……
液體燃料	石 油	汽油、煤油、柴油、重油……
氣體燃料	天然煤氣	高爐煤氣、發生爐煤氣、煉焦煤氣……

燃料可按其用途分為動力燃料和工藝燃料。後者為特殊生產工藝的目的所需用的燃料，一般對燃料有特殊的要求。例如，冶金工業中對煉焦用煤的質量要求很高，這種煤應具有很好的焦結性，使能煉出機械強度很高的焦炭，而且雜質含量，特別是含硫量很少。因此，我們動力工作者應設法盡量節約優質燃料，以支援其他工業部門。

我國燃料資源極其豐富，以煤尤甚。目前我國的鍋爐，主要用煤作為燃料。

第一節 燃料的化學成分

所有燃料都是有機物質，它是由可燃質、不可燃的無機物和水分組成的。燃料的可燃質是高分子化合物的混合物，它包含有下列元素碳C、氫H、氧O、氮N和硫S。

一、碳

碳是燃料的主要元素。它基本上決定了燃料發熱量的大小。一公斤碳完全燃燒（生成二氧化碳）時，放出約8000千卡的熱量。但碳本身要在比較高的溫度下才能燃燒，純碳是很難燃燒的。所以燃料中含碳量愈多（如无烟煤）越不容易着火和燃燒。

燃料中的碳，不是以游離狀態存在，而是和氫、氮、硫等組成的有機化合物。

燃料埋藏於地下的化學年代越長，其中的不穩定（易揮發）成分，如水分、氧、氫、氮等，由於分解出來而越來越少，而碳的含量則相對增加，化學年代較長的无烟煤，可燃質中碳的含量占90~93%。而年代較淺的泥煤，則僅有50~60%。

二、氫

固體燃料中氫的含量變化於2~10%的範圍內。重油含氫量較多。天然煤氣中氫的含量特別高。氫燃燒時放出大量的熱量。一公斤氫完全燃燒後生成水時，放出約34000千卡的熱量。即相當於碳發熱量的四倍半左右。在鍋爐機組中，燃燒是在高溫下進行

的，氢燃烧后，只能产生水蒸汽，不会凝結为水，因此水蒸汽的汽化潜热并没有放出来。所以在锅炉机组中氢燃烧所放出来的热量比上述数值低。由于一公斤氢燃烧时生成9公斤水蒸汽。在标准状态下水蒸汽的汽化潜热为600千卡/公斤，所以一公斤氢在锅炉中燃烧时放出 $34000 - 9 \times 600 = 28,600$ 千卡的热量。

燃料中同时含有氢和氧，一部分氢和燃料中的氧化合在一起，成为稳定的氧化物，这种氧化物是没有燃烧能力的。和氧化合在一起的那一部分氢，称为“化合氢” H_{comb} 。其余存在于燃料的可燃化合物(如 $C_m H_n$)中的氢，称为“游离氢”或“有效氢” H_{noA} 。

假定燃料中的氧(以O表示其在燃料中的百分数含量)完全处于与氢化合的状态，由于一分氢能和1/8氧结合，则燃料中的有效氢为

$$H_{\text{noA}} = H - \frac{O}{8}, \quad (2-1)$$

式中 H ——燃料中氢的总含量，%。

含氢较多的燃料燃烧时，易于生成烟子(碳黑)。因此重油及含氢量高的固体燃料，往往生成熏黑的火焰。

气体状态的氢，比较容易燃烧，其发热量也高。因此，燃料含氢量多，一般易于点燃。

三、氧和氮

燃料中的氧和氮是有机废物。这些元素的存在使燃料成分中的可燃元素——碳和氢减少。此外，氧和燃料中一部分氢或碳一起处于化合状态，因而降低了燃料燃烧时所放出来的热量。

燃料中含氮量很少，一般为0.5~2.5%，在大气压力下，氮不进行氧化，而在烟气中呈游离状态(N_2)。

不同燃料，其含氧量变化很大，最高者达40%。燃料的年龄增长，氧的含量就降低。

四、硫

在固体燃料中，我们常遇到三种形态的硫：(1)有机硫 S_{op} ，(2)黄铁矿硫 S_k 和(3)硫酸盐硫 S_c 。有机硫和燃料中的主要元素(C, H, O)结合成复杂的有机化合物，均匀分布在燃料中。黄铁矿硫，最常见的是 FeS_2 。在燃料燃烧时，上述两种硫均能氧化放热，而硫酸盐硫，如 $CaSO_4$ 、 $MgSO_4$ 、 $FeSO_4$ 等等，几乎不再进行氧化，故不参与燃烧。这部分硫被归并到灰分一类。前两种可以燃烧的硫，合称为可燃硫或挥发性硫 $S_A = S_{op} + S_k$ 。

燃料中总含硫量则为：

$$S = S_{op} + S_k + S_c \% \quad (2-2)$$

硫的发热量不高，约为碳发热量的1/3.5。而燃料中硫的存在对锅炉机组有很大的害处。它会使得锅炉尾部受热面受到强烈的腐蚀，因为硫的氧化产物，除二氧化硫 SO_2 外，还有三氧化硫 SO_3 ，三氧化硫有和水蒸汽化合成硫酸蒸汽的能力，当烟气和锅炉尾部受热面(温度较低)接触时，硫酸蒸汽便在其上凝結为硫酸溶液，硫酸溶液的腐蚀性是很强的。含硫多的燃料不能用来冶炼金属。因此燃料中的硫被视为有害元素。

五、水分

各种固体燃料中水分的含量变化很大,从5%到60%。液体和气体燃料中的水分則很少。工作燃料的水分,可以分为外部水分(机械水分) W_{Bn} 和内部水分(吸附水分) W_{rp} 两种。

所謂吸附水分,是指把燃料置于被蒸汽所饱和的空間中达到平衡状态后所含的水分。所謂平衡状态,就是燃料中水蒸汽的压力等于周圍空間的水蒸汽分压力。如果燃料中水蒸汽的压力大于周圍空間水蒸汽的分压力,則从燃料中逸出的水蒸汽分子数,比从空間进入燃料内部的分子数来得多,于是燃料就失一部分水分,直至两者水蒸汽分压力相等为止。

依靠自然干燥能除去的那部分水分,称为外部水分。吸附水分是不能依靠在空气中自然干燥来除掉的,必須在干燥器加热至 $103\sim 105^{\circ}\text{C}$,使燃料中水蒸汽压力大于大气压力,这些水分才能除去。

分析水分这一术语,是指一定条件下的吸附水分,即在实验室条件下(温度 20°C ,相对湿度 $\varphi=65\%$)进行空气干燥时燃料所具有的水分。

固体燃料中内部水分的含量大約为 $1\sim 10\%$ 。然而实验室中所求得的燃料水分,常常比燃料中实际所有的水分少。这是因为在許多燃料中,还包含有結晶水分或化合水分,它存在于某些矿物性化合物(如粘土、矽酸盐等)中。这种水分为数虽少,但往往要在比較高的温度下才能放出(例如,要使 $\text{CaCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 中的結晶水放出来,需要大約 800°C 的高温)。

燃料中水分的存在,無論对于燃料的质量,或者对于鍋炉机组的工作,都起不良作用。由于水分的存在,减少了燃料中可燃元素的含量,因而减少了燃料燃燒时所放出的热量。此外,还需要一部分热量消耗于水分的蒸发以及随水蒸汽从鍋炉机组排至大气,前者使炉膛温度下降,后者降低了鍋炉的效率。炉膛温度降低使燃料着火发生困难,其次,燃料中的水分,在燃料燃燒时生成大量的水蒸汽(大气压力下,水蒸汽的容积比水的容积大一千多倍!),因而增加了烟气体积和引风机的电耗。鍋炉排烟温度較低时,燃料中的水分有使鍋炉尾部受热面受到强烈腐蝕的危險。因此水分被称为燃料的外部杂质。

六、灰分

燃料中含有許多矿物质,主要是粘土 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及氧化矽 SiO_2 等。此外,还含有为量不多的氧化鉄 FeO ,鉄和碱土金属(Ca 、 Mg)的硫酸盐、碳酸盐和矽酸盐,碱类及氯化物等等。所有这些矿物质几乎都是高氧化物,不能燃燒,当燃料燃燒后,即形成固体残余物,被統称为灰分。就来源而言,灰分可以分为三种:

形成燃料的植物中所含有的矿物质,构成第一类灰分。它和燃料中的有机质結合在一起,因此在燃料中的分布比較均匀,在选矿时无法除去。这类灰分为量不多,很少超过 $1\sim 2\%$ 。

第二类灰分是在燃料形成时期从外面带进来的。它在燃料中的分布很不均匀。

第一和第二类灰分称为內在灰分。

第三类灰分,也称为外来灰分,是燃料开采时期带进来的矿石、沙、泥土等,也可能是运输或儲存过程中带进来的。它在燃料中的分布最不均匀,在选矿时可以除去一部分。

灰分的成分和重量,在燃料燃燒前、后是不完全相同的。这是因为在燃燒过程中会

发生一些化学变化，一些矿物质在高温作用下失去结晶水或进行分解而放出气体（例如碳酸钙在高温下分解，放出二氧化碳），使灰分重量减轻；这些物质进行氧化反应而使灰分重量增加。

灰分也被视为燃料的外部杂质。因为燃料中灰分的存在，使燃料可燃质减少，因而降低了燃料的发热量。烟气速度高时，灰分增加对流受热面的磨损，速度低时，又易于沉淀于受热面上，因而使受热面的热交换恶化，锅炉机组的效率降低。在层燃炉里，多灰燃料的燃烧比较困难，灰分把可燃质包裹起来使其难于完全燃烧，熔化的灰分更加恶化燃烧过程。灰分随烟气排至大气，弄脏周围的空气，为防止这一点必须装置除尘设备，因而增加建筑费用。

综上所述，燃料的成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分。在进行燃料分析时，这些成分可用重量百分数表示之。由于目的不同，通常表示燃料的成分可用其工作质、干燥质、分析质、可燃质和有机质等为准。燃料的工作质就是进入锅炉车间准备燃烧的燃料，其元素组成可写为：

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_x^p + A^p + W^p = 100\%, \quad (2-3)$$

式中 C^p 、 H^p 、 O^p 、 N^p 、 S_x^p 、 A^p 和 W^p 分别表示燃料工作质成分中碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水的重量百分数，且 $S_x^p = S_{op}^p + S_k^p$ 。

燃料中的水分是经常变动的（与开采情况、气候等有关）。当同一产地的燃料水分变动时，工作质成分中其他元素的百分含量也将变动。为了得到比较稳定的成分含量，可用人工方法将燃料中的水分除去，即得所谓燃料的“干燥质”成分表示法：

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S_{op}^c + S_k^c + A^c = 100\%, \quad (2-4)$$

各元素符号上的角码“c”表示燃料的“干燥质”成分。

为了对燃料进行分析而在实验室内进行空气干燥，空气干燥后，燃料的成分称为“分析质”成分，其元素组成如下：

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_{op}^a + S_k^a + A^a + W^a = 100\%, \quad (2-5)$$

角码“a”表示燃料的“分析质”成分。

燃料中的灰分也是不稳定的元素（与开采、运输、储存等情况有关）。稳定的元素成分，是以“可燃质”或“有机质”成分表示。所谓可燃质（以角码“i”表示），是指除去水分和灰分后的燃料成分，即：

$$C^i + H^i + O^i + S_{op}^i + S_k^i = 100\% . \quad (2-6)$$

可燃质成分中除去黄铁矿硫 S_k 后，即得有机质成分（以角码“o”表示），

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_{op}^o = 100\% . \quad (2-7)$$

燃料的特性一般用比较稳定的可燃质成分表示。而在锅炉设计和运行中，则必须采用工作质成分。它们之间可按下列式换算：

$$\left. \begin{aligned} C^p &= C^i \cdot \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} \% ; \\ H^p &= H^i \cdot \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} \% ; \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

不同质的成分的换算系数，列于表 2-2 中。

表2-2 燃料成分换算表

已 知 \ 所 求	工 作 质	分 析 质	干 燥 质	可 燃 质
工 作 质	1	$\frac{100-W^a}{100-W^p}$	$\frac{100}{100-W^p}$	$\frac{100}{100-W^p-A^p}$
分 析 质	$\frac{100-W^p}{100-W^a}$	1	$\frac{100}{100-W^a}$	$\frac{100}{100-W^a-A^a}$
干 燥 质	$\frac{100-W^p}{100}$	$\frac{100-W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100-A^c}$
可 燃 质	$\frac{100-W^p-A^p}{100}$	$\frac{100-W^a-A^a}{100}$	$\frac{100-A^c}{100}$	1

第二节 燃料的特性

一、燃料的发热量

发热量是燃料的主要特征之一。在计算中，对于固体和液体燃料，发热量用千卡/公斤表示；对于气体燃料则以千卡/标准米³表示。所谓标准米³，是指标准状态下(0°C, 760毫米水银柱)气体的体积为1米³。

燃料的发热量分高发热量和低发热量。高发热量是燃料的最大可能发热量，即包括燃料燃烧后所生成的水蒸汽全部凝结为水所放出的凝结热(即汽化潜热)。如前所述，燃料在锅炉内燃烧时，由于烟气温度高(当烟气从锅炉机组排出时仍有100~200°C)，烟气中水蒸汽一般不能凝结，因而水蒸汽的汽化潜热未放出来；或者说，需要一部分热量消耗于水的汽化，因此燃料的实际放热量减少。燃料燃烧时，扣除去(消耗于)燃料中水的汽化热后所实际放出来的热量，称为低发热量。

对于燃料的工作质成分，高发热量 Q_p^H 和低发热量 Q_p^L 之间有如下关系：

$$Q_p^L = Q_p^H - 600 \left(\frac{9H^p}{100} + \frac{W^p}{100} \right) \text{千卡/公斤。} \quad (2-9)$$

式中600千卡/公斤为标准状态下水的汽化潜热，括号内的数值为一公斤燃料燃烧后所生成的水分。

燃料发热量的大小决定于燃料中可燃质(C, H, S)的多少。然而，燃料的发热量并不等于各可燃元素发热量的算术总和。因为燃料并不是各种元素的机械混合物，其中包含有极其复杂的化合关系。这就使得难于采用理论公式来计算燃料的发热量，到目前为止，还不能不借助于试验和经验公式。

固体和液体燃料的发热量，通常用“氧弹式测热仪”来测量。将一定量的燃料置于充氧达20~30大气压(采取这样高的压力，目的是使燃料迅速而完全燃烧)的氧弹容器内，燃料燃烧所放出的热量被测热仪内的水所吸收，测出水温的升高数值，然后作必要的计算和修正，即可得到燃料发热量的数值。

燃料发热量的经验公式很多，对于固体和液体燃料，最精确的经验公式是门捷列夫公式：

$$Q_p^p = 81C^p + 300H^p - 26(O^p - S_2^p) \text{ 千卡/公斤。} \quad (2-10)$$

当燃料的成分不是以工作质，例如以干燥质或可燃质表示时，便有相应的以干燥质或可燃质表示的高发热量和低发热量。它们之间的关系以下列换算公式表示之：

$$Q_n^c = Q_c^c - 600 \cdot \frac{9H^c}{100} = Q_c^c - 54H^c \text{ 千卡/公斤，} \quad (2-11)$$

$$Q_n^c = Q_c^c - 54H^c \text{ 千卡/公斤，} \quad (2-12)$$

$$Q_n^p = Q_n^c \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} - 6W^p \text{ 千卡/公斤，} \quad (2-13)$$

$$Q_n^c = Q_n^p \frac{100}{100 - A^c} \text{ 千卡/公斤，} \quad (2-14)$$

.....

各种燃料的发热量，差别是很大的，有时为了计算及厂矿编制计划的方便，采用所谓标准燃料的概念，把工作质低发热量 $Q_n^p = 7000$ 千卡/公斤的燃料，称为标准燃料。

燃料中各元素的含量均以重量百分数表示。但是为了估计各种燃料有害元素(硫)或外部废物(水分、灰分)的数量，往往把这些元素的含量与燃料的低发热量联系起来：

$$\left. \begin{aligned} W^{np} &= \frac{W^p}{Q_n^p} = 1000 \frac{W^p}{Q_n^p} \% , \\ A^{np} &= 1000 \frac{A^p}{Q_n^p} \% , \\ S^{np} &= 1000 \frac{S^p}{Q_n^p} \% , \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

式中 W^{np} 、 A^{np} 及 S^{np} 分别称为燃料的折算水分、折算灰分和折算硫分(或引用水分、引用灰分和引用硫分)，它对应于燃料每1,000千卡低发热量的水分、灰分和硫分。

如果燃料的折算水分 W^{np} 、折算灰分 A^{np} 和折算硫分 S^{np} 分别超过8%、4%和0.2%，则相应的燃料称为高水分、多灰或多硫燃料。

二、挥发份和焦炭

燃料加热时，首先放出所含水分，当温度继续升高而不供给空气时，燃料中的有机物质开始分解，放出一种气态物质，称为挥发份。挥发份中包含有各种碳氢化合物 C_mH_n ，氢 H_2 、一氧化碳 CO 等等。组成挥发份的元素是 O 、 N 、 H 、 S_{op} 、 S_k 及部分碳 C (见图2-1)。

折出挥发份的剩余物质，主要是一部分碳(固定碳)和全部灰分 A ，称为焦炭。

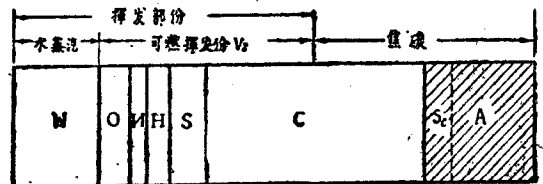


图 2-1 燃料的挥发份和焦炭

不同燃料开始放出挥发份的温度是不同的。地质年龄轻的燃料，如木材、泥煤，在较低的温度下(100~160°C)就迅速放出挥发份；褐煤和烟煤开始放出挥发份的温度高些；贫煤和无烟煤要在约400°C左右才开始折出挥发份(见表2-3)。

燃料挥发份的多少也与燃料性质有关。地质年龄较轻的燃料，挥发份较多，褐煤