



全国高等教育自学考试

电厂锅炉 自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
袁镇福 编著



浙江大学出版社

Q · G · G · D · J · Y · Z · X · K · S

全国高等教育自学考试

电厂锅炉自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会组编

袁镇福 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

电厂锅炉自学辅导/袁镇福编著. —杭州:浙江大学出版社, 2002. 3

ISBN 7-308-02931-X

I. 电... II. 袁... III. 火电厂—锅炉—高等教育—自学考试—自学参考资料 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008416 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 徐宝澍

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 9.75

字 数 250 千

印 数 0001—3070

版 次 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-02931-X/TM·017

定 价 15.60 元

出版前言

为了完善高等教育自学考试教育形式,促进高等教育自学考试的发展,我们组织编写了全国高等教育自学考试自学辅导书。

自学辅导书以全国考委公布的课程自学考试大纲为依据,以全国统编自考教材为蓝本,旨在帮助自学者达到学习目标,顺利通过国家考试。

自学辅导书是高等教育自学考试教育媒体的重要组成部分,我们将根据专业的开考情况和考生的实际需要,陆续组织编写、出版文字、音像等多种自学媒体,由此构成与大纲、教材相配套的、完整的自学媒体系统。

全国高等教育自学考试指导委员会
1999年10月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 锅炉设备的组成及工作过程	(1)
1.2 锅炉容量和参数	(3)
1.3 锅炉的分类和型号	(4)
1.4 锅炉的安全和经济指标	(5)
第 2 章 燃料	(6)
2.1 煤的成分及分析基准	(6)
2.2 煤的主要特性	(10)
2.3 我国煤的分类方法	(13)
2.4 液体燃料	(13)
第 3 章 燃料燃烧计算	(15)
3.1 燃烧所需空气量和过量空气系数	(16)
3.2 烟气成分及烟气量计算	(17)
3.3 烟气分析	(18)
3.4 燃烧方程式	(20)
3.5 锅炉运行时过量空气系数和漏风系数的确定	(22)
3.6 空气焓和烟气焓的计算	(22)
第 4 章 锅炉机组热平衡	(24)
4.1 锅炉机组热平衡方程	(24)
4.2 锅炉输入热量	(26)
4.3 锅炉有效利用热量	(26)
4.4 锅炉的各项热损失	(27)
4.5 锅炉热效率及燃料消耗量	(30)
第 5 章 煤粉制备	(32)
5.1 煤粉的性质及品质	(32)
5.2 磨煤机	(35)
5.3 制粉系统	(38)
第 6 章 燃料燃烧原理及燃烧设备	(41)
6.1 燃烧反应的理论基础	(41)
6.2 燃烧方式与炉型	(43)
6.3 煤粉燃烧及煤粉和油燃烧器	(43)
6.4 煤粉炉炉膛	(52)

第7章 过热器与再热器	(54)
7.1 过热器和再热器的作用、特点及再热器的保护	(54)
7.2 过热器、再热器的型式和结构	(57)
7.3 过热器、再热器汽温特性及影响汽温因素	(58)
7.4 热偏差	(61)
7.5 汽温调节方法	(65)
7.6 过热器、再热器系统	(67)
第8章 省煤器和空气预热器	(68)
8.1 省煤器	(68)
8.2 空气预热器	(70)
8.3 尾部受热面双级布置	(71)
8.4 尾部受热面的积灰、磨损和低温腐蚀	(73)
第9章 蒸发设备和自然水循环	(78)
9.1 锅炉蒸发设备	(78)
9.2 蒸发管内汽水两相流动的基本特性	(79)
9.3 自然水循环原理	(82)
9.4 自然水循环工作的可靠性指标	(86)
9.5 循环回路特性曲线	(88)
9.6 自然水循环故障	(89)
9.7 提高自然水循环可靠性的措施	(92)
第10章 蒸汽净化	(93)
10.1 蒸汽含盐的危害及蒸汽质量标准	(93)
10.2 蒸汽污染的原因	(94)
10.3 提高蒸汽品质的途径	(98)
第11章 强制流动锅炉	(101)
11.1 控制循环锅炉	(101)
11.2 直流锅炉	(103)
11.3 复合循环锅炉	(105)
11.4 强制流动锅炉蒸发受热面的流动特性与传热	(108)
第12章 锅炉设计参数的选择及整体布置	(115)
12.1 锅炉主要设计参数的选择	(115)
12.2 影响锅炉整体布置的因素	(118)
12.3 锅炉的典型布置	(120)
第13章 锅炉热力计算	(123)
13.1 炉膛热力计算	(123)
13.2 对流受热面的热力计算	(133)
13.3 锅炉热力计算误差检查	(149)

第 1 章 绪 论

“电厂锅炉”的许多知识点涉及到各种锅炉本体设备和辅助设备。将零散的设备有机联系起来,有一个较明确的概念,对后面学习各设备的结构、原理、性能、相互关系和综合应用等很有益处。本章介绍的锅炉及辅助设备的组成及工作原理就是为了让学生先对整个系统有个全面的了解,并掌握锅炉容量、参数和分类等基本知识。虽然内容不多,但需要多花点时间,对这章内容有较清楚的识记。

有条件的话,在开始学习“电厂锅炉”课程时能到就近的火力发电厂进行参观或实习,详细看一看电厂中实际的锅炉本体和辅助设备,以及它们的布置与联系情况,有一个感性认识。这将大大有利于对“电厂锅炉”课程内容的理解,也能加深记忆。

锅炉是电厂中事故发生率最高的设备,锅炉的安全运行是电厂安全的基础,锅炉设备的设计和运行过程都始终将安全运行放在首要位置。

建议本章自学总时数安排约 6 学时,各节学时数安排建议如下表,供自学时参考。

节次	内 容	自学时间	节次	内 容	自学时间
一	锅炉设备的组成及工作过程	3	四	锅炉的安全和经济指标	0.5
二	锅炉容量和参数	1	五	国内外电厂锅炉概况	0.5
三	锅炉的分类和型号	1			

1.1 锅炉设备的组成及工作过程

锅炉、汽轮机、发电机是火力发电厂的三大动力设备,其中,锅炉是电厂将燃料的化学能转变成电能的整个生产过程中,将燃料的化学能转变成蒸汽的热能的设备。锅炉由锅与炉组成,在锅炉中有两个能量转变过程:①在锅炉的炉膛中,通过燃烧的方式使燃料的化学能释放,变成高温烟气的热能;②通过热量传递的方式将高温烟气中的热量传递给锅(锅炉的汽水系统)中的水与汽,生产出高温高压蒸汽。从锅炉出来的蒸汽进入汽轮机,冲击叶片,使汽轮机转子高速旋转,实现热能向机械能的转变。汽轮机转子带动发电机旋转,发出电能,完成从机械能到电能的转变。上述四个过程,除了燃料通过氧化反应(燃烧)释放热量是化学过程外,其余都为物理过程。

在学习本节内容时,为便于理解和记忆,建议将锅炉设备的“组成”与“工作过程”结合起来学习,也就是说,在了解锅炉的各个工作过程的同时,还要了解各个工作过程在什么设备内进行和完成。锅炉及辅助设备系统如图 1-1 所示。

通常将锅炉的工作过程分为炉内过程与锅内过程。炉内过程包括燃烧、放热、排渣等过程,在锅炉的燃烧系统内完成。锅内过程包括工质(水和汽)流动、传热、汽水分离、热化学等过程,在锅炉的汽水系统内完成。上述两大过程可用流程图来表示,现以中型发电机组没有再热器的

高压自然循环固态排渣煤粉锅炉为例说明,燃烧系统流程如图 1-2 所示,汽水系统流程如图 1-3 所示。同时结合锅炉及其辅助设备系统(图 1-1)一起学习。

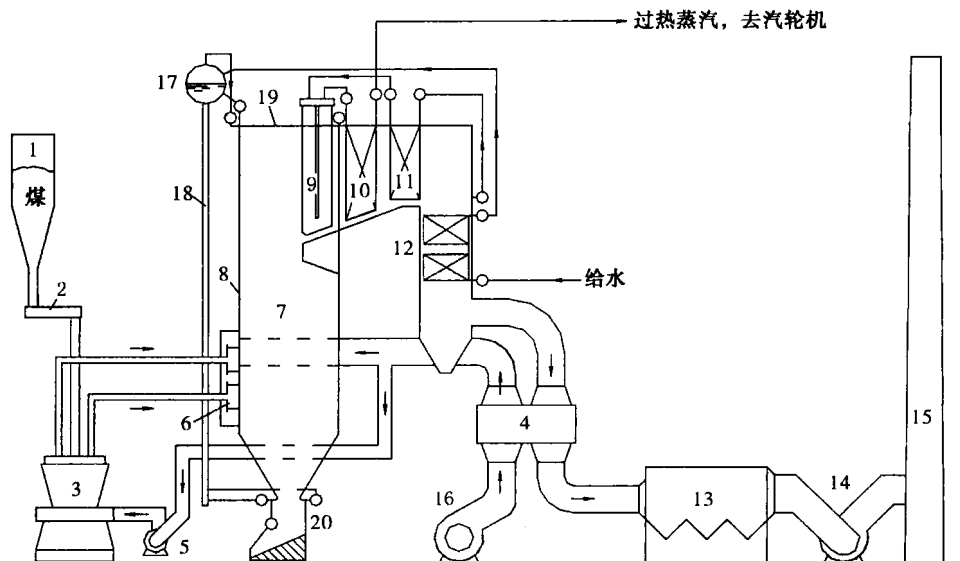


图 1-1 锅炉及其辅助设备系统简图

- 1—煤斗;2—给煤机;3—磨煤机;4—空气预热器;5—排粉风机;6—燃烧器;7—炉膛;
8—水冷壁;9—屏式过热器;10—高温过热器;11—低温过热器;12—省煤器;13—除尘器;
14—引风机;15—烟囱;16—送风机;17—汽包;18—下降管;19—顶棚过热器;20—排渣室(渣井)

图 1-2 中,虚线框内为锅炉本体的设备,其他为锅炉辅助设备。如图 1-1 与图 1-2 所示,煤由给煤机送进磨煤机,在磨煤机中进行煤粉磨制过程;空气经送风机送入空气预热器,在空气预热器中完成空气加热过程;被加热的空气经排粉风机进入磨煤机,将磨制的煤粉带出磨煤机,通过燃烧器喷入炉膛,着火燃烧。另一部分热空气(二次风)直接通过燃烧器进入炉膛参与燃烧。燃烧器出口的煤粉气流燃烧非常强烈,燃烧中心火焰温度可达 1400°C 以上。在炉膛内,燃烧形成的高温烟气(火焰)主要以辐射传热的方式将热量传递给布置在炉膛四周的水冷壁,加热水冷壁管中的水,使管中一部分水蒸发成为水蒸气,同时烟气被冷却。离开炉膛的烟气依次流过屏式过热器、高温过热器、低温过热器、省煤器和空气预热器等受热面,将热量分别传递给过热器中的蒸汽、省煤器中的水和空气预热器中的空气,完成放热过程。煤粉燃烧形成的灰渣,大部分(90%左右)随烟气一起流动,带出锅炉本体,称飞灰;少部分(10%左右)形成灰粒或焦渣落入炉膛底部斜锥形的冷灰斗,经排渣室排出,称灰渣。

如图 1-1 与图 1-3 所示,由给水泵升压输送来的给水进入省煤器,在省煤器中加热升温后进入汽包,汽包中的炉水沿下降管经下联箱进入水冷壁,在水冷壁中吸收炉膛中火焰的辐射热量,部分水蒸发,形成汽水混合物流入汽包。所以水冷壁又称蒸发受热面。汽水混合物在汽包中经汽水分离装置分离,分离出的饱和蒸汽从汽包顶部引出,依次经过各级过热器,吸收烟气中通过对流和辐射方式传入的热量,形成高温、高压的过热蒸汽,然后经主蒸汽管道送往汽轮机。

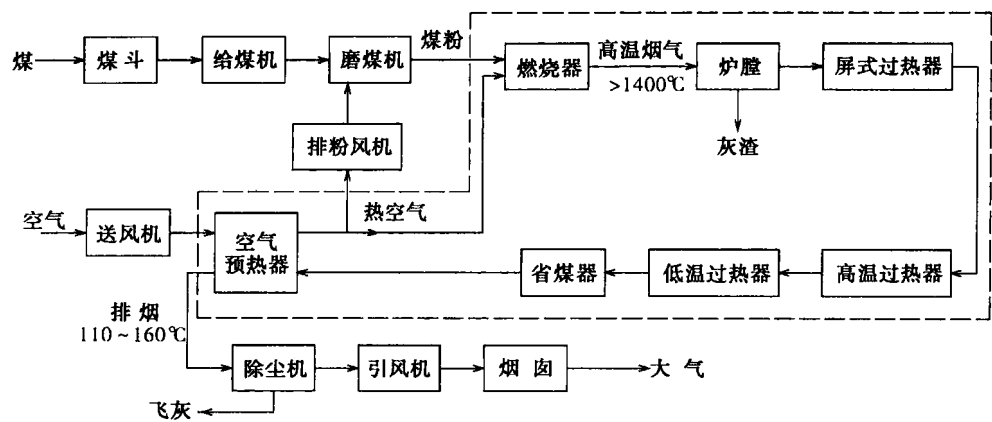


图 1-2 燃烧系统流程图

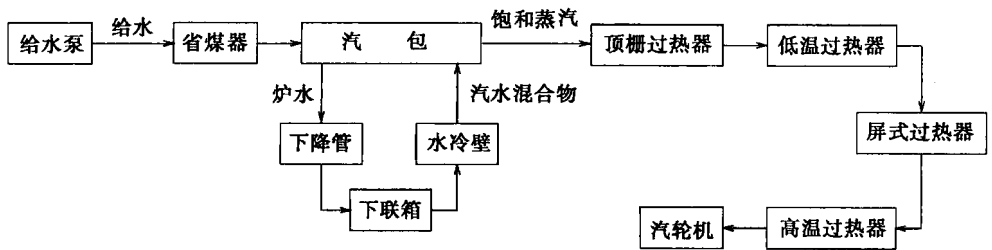


图 1-3 汽水系统流程图

1.2 锅炉容量和参数

本节主要记住额定蒸汽压力、额定蒸汽温度、额定蒸发量、最大连续蒸发量等几个概念，它们的定义分别为：

1. 额定蒸汽压力：锅炉在额定的给水压力和规定的负荷范围内，长期连续运行时应予保证的过热器出口蒸汽压力。符号为 p ，单位为 MPa。
2. 额定蒸汽温度：锅炉在规定的负荷范围内，在额定蒸汽压力和额定给水温度下，长期连续运行必须予以保证的过热器出口蒸汽温度。符号为 t ，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。
3. 额定蒸发量：锅炉在额定蒸汽参数、额定给水温度、使用设计燃料，并保证热效率时所规定的蒸发量。符号为 D_e ，单位为 t/h(或 kg/s)。
4. 最大连续蒸发量：锅炉在额定蒸汽参数、额定给水温度和使用设计燃料，长期连续运行时所能达到的最大蒸发量。国际上称 MCR，也有称 BMCR。

锅炉蒸汽压力在超高压(13.7MPa)以上具有中间再热的锅炉，蒸汽参数还将包括再热器进出口的蒸汽压力和温度。

锅炉容量又称出力、负荷、蒸发量，符号为 D ，单位为 t/h。

我国国家标准规定电厂锅炉蒸汽参数及容量系列，以及所配凝汽式汽轮发电机组功率，如教材《电厂锅炉》表 1-1 所示。表中有 Δ 为我国采用的系列〔注：表中“蒸发量”指的是“最大连续

蒸发量”]。

☆ 上述参数中最容易混淆的是 D_r 与 MCR。在国家标准 GB10184—88《电站锅炉性能试验规程》颁布之前,没有明确定义“最大连续蒸发量”与“额定蒸发量”,而将目前的 MCR 称为额定蒸发量。所以现在还有一些书中仍将 MCR 称为 D_r 。

1.3 锅炉的分类和型号

1.3.1 锅炉的分类

1. 按容量分类
 - (1) 小容量锅炉, $MCR < 220t/h$
 - (2) 中容量锅炉, $MCR = 220 \sim 670t/h$
 - (3) 大容量锅炉, $MCR > 670t/h$

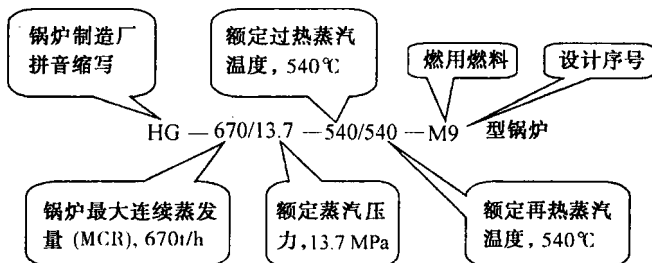
(注:教材《电厂锅炉》中写成额定蒸发量 $D_r < 220t/h$ 等,似乎不太妥当)
2. 按蒸汽压力分类
 - (1) 低压锅炉, $P \leq 2.45MPa$ (表压)
 - (2) 中压锅炉, $P = 2.94 \sim 4.9MPa$ (表压)
 - (3) 高压锅炉, $P = 7.84 \sim 10.08MPa$ (表压)
 - (4) 超高压锅炉, $P = 11.8 \sim 14.7MPa$ (表压)
 - (5) 亚临界压力锅炉, $P = 15.7 \sim 19.6MPa$ (表压)
 - (6) 超临界压力锅炉, $P \geq 22.1MPa$ (表压)
3. 按燃用燃烧分类
 - (1) 燃煤锅炉
 - (2) 燃油锅炉
 - (3) 燃气锅炉
 - (4) 余热锅炉
 - (5) 特种燃料锅炉(燃垃圾、废渣、废水等)
4. 按燃烧方式分类
 - (1) 火床炉(也称层燃炉)-层状燃烧方式
 - (2) 火室炉(也称室燃炉)-悬浮燃烧方式
 - (3) 流化床锅炉(包括循环流化床炉)-沸腾燃烧方式
5. 按蒸发受热面内工质流动方式分类
 - (1) 自然循环锅炉
 - (2) 控制循环锅炉
 - (3) 直流锅炉
 - (4) 复合循环锅炉
6. 按排渣方式分类
 - (1) 固态排渣炉
 - (2) 液态排渣炉
7. 按炉膛压力分类
 - (1) 负压燃烧锅炉(炉膛内烟气静压小于大气压力)
 - (2) 微正压燃烧锅炉(炉膛内烟气静压稍大于大气压, 仅为 $1.96 \sim 4.9kPa$)
 - (3) 压力燃烧锅炉(炉膛内烟气静压大于大气压力较大)

锅炉每一种分类方法都反映了锅炉的某一方面特征,通常为了说明某台锅炉的特征,在称呼锅炉时总是同时指明以上各类的特征。例如:670t/h 超高压自然循环固态排渣煤粉炉(煤粉燃烧为火室燃烧方式);410t/h 高压自然循环微正压燃油锅炉(燃油雾化为火室燃烧方式);

600MW 中间再热亚临界压力控制循环固态排渣煤粉炉(配 600MW 凝汽式汽轮机的锅炉容量为 2008t/h;“中间再热”表明锅炉具有再热器)。

1.3.2 电厂锅炉型号

以下是电厂锅炉型号的表示方法以及各字母和数字代表的意义。



注 1: HG—哈尔滨锅炉厂, SG—上海锅炉厂, DG—东方锅炉厂, WG—武汉锅炉厂, BG—北京锅炉厂。

注 2: M—煤, Y—油, Q—气, T—其他燃料。

1.4 锅炉的安全和经济指标

由于电力生产在人类生产和生活中的重要地位,以及电能无法储存的生产特点,决定了电厂设备安全可靠运行是第一位的。同时,电厂也只有在保持长时间稳定运行时,才有更大的经济效益。所以,电厂锅炉也是在保证安全运行的前提下,提高经济性。

1.4.1 锅炉的安全技术指标

锅炉安全技术指标有:

1. 连续运行时数=两次检修之间运行时数(连续运行时数越多安全可靠性能越高)。

2. 事故率= $\frac{\text{事故停用时间}}{\text{总运行时间} + \text{事故停用时间}} \times 100\%$ (事故率越小安全可靠性能越高)

3. 可用率= $\frac{\text{运行总时间} + \text{备用总时间}}{\text{统计期间总时间}} \times 100\%$ (可用率越大安全可靠性能越高)

在进行事故率和可用率计算时,以一年作为一个统计计算周期,统计期间总时数为 8760h,等式中的各种“时数”都是在一年的统计期内发生的小时数。

1.4.2 锅炉的经济性指标

锅炉的经济性指标包括锅炉热效率与锅炉钢材消耗量。锅炉热效率将在第 4 章中详细介绍。

★ 国内外电厂锅炉发展概况

本节不作考核要求,有兴趣者可了解《电厂锅炉》书中的内容,也可参考中国电力出版社出版的《电站锅炉原理》等其他参考书,以扩大眼界,对后面内容的学习会有一定的帮助。

第2章 燃 料

本章介绍的是与锅炉燃烧有关的燃料特性,在学习锅炉燃烧原理、锅炉设备设计和运行,以及锅炉热力计算知识时都将反复用到这些知识,所以对这一章中考试大纲规定的知识点最好能够背记,这样在后面学到与此有联系的内容时不必经常翻书复习,可省去许多时间。

建议本章自学总时数安排约 15~16 学时,各节学时数安排建议如下表,供参考。

节次	内 容	自学时间	节次	内 容	自学时间
一	煤的成分及分析基准	6.5	四	液体燃料	1
二	煤的主要特性	6	五	气体燃料	0.5
三	我国煤的分类	2			

2.1 煤的成分及分析基准

在学习“煤的成分及分析基准”之前先仔细看一下图 2-1,图中矩形框的长度代表煤的总量,每格代表组成煤的各元素分析成分,格中文字为元素分析成分名称,字母为各成分的代号,格子的宽度代表各成分所占的大约份额,矩形框下方箭头所指范围为煤的工业分析成分及其所占的大致份额。其中,水分与挥发分加在一起统称为挥发性物质,固定碳与灰分在未灰化前混在一起称为焦炭。矩形框上方各组箭头所指范围为各种煤的成分分析基准所对应的煤的总量,从中可以看出各分析基准之间的差别及它们之间的关系。

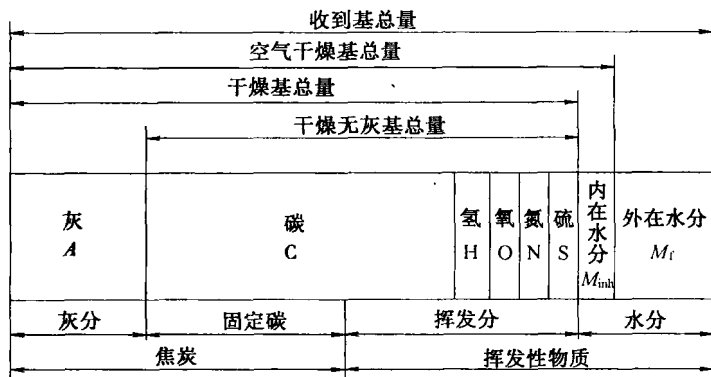


图 2-1 煤的成分及分析基准之间的关系

2.1.1 煤的成分分析及其对锅炉工作的影响

无论是煤粉、煤粒或煤块,进入锅炉炉膛参加燃烧时,都将经历四个阶段:

(1) 水分蒸发:煤粉进入炉膛后被迅速加热,在上升至 100℃ 前,煤中的水分首先全部蒸

发。

(2)挥发分析出:当温度再升高时,煤粉开始热解,析出挥发分,形成焦炭颗粒。

(3)着火燃烧:挥发分主要由甲烷等多种碳氢化合物(C_nH_m)、氢(H_2)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)等可燃气体组成,极易着火燃烧。所以,当挥发分析出后,立即在焦炭颗粒周围着火燃烧,放出大量热量,从而加热焦炭颗粒,使焦炭颗粒也着火燃烧。

(4)燃尽:焦炭颗粒燃烧将持续稍长时间,直至焦炭中的可燃物(碳)燃尽,变为灰渣。

根据上述煤的燃烧特性,将煤的成分分为水分(M)、挥发分(V)、固定碳(FC)和灰分(A),就是通常所称的工业分析成分。所以可以通过煤的工业分析成分判断煤的着火难易程度(着火温度高低),以及是否容易燃烧完全。

例如:挥发分(V)高的烟煤,着火温度低,煤容易着火,同时,煤中的挥发分析出得多,形成的焦炭的孔隙也多,空气中的氧容易进入空隙,氧气与焦炭接触的面积大,燃烧的速度快,容易燃烧完全。而挥发分低的无烟煤,着火温度高,着火困难,燃尽所需的时间长。

煤中的水分和灰分不利于煤的着火与燃烧,是有害成分。

水分的害处有:①水分蒸发吸收热量,使煤的加热速度减慢,将增加着火和燃烧的困难;②锅炉排烟温度在 110°C 以上,水分吸热变成蒸汽随烟气排入大气,造成热量损失;③蒸汽增加烟气体积,使引风机电耗增加;④烟气中的蒸汽若在低温空气预热器受热面上结露,会造成空气预热器腐蚀与堵灰;⑤还将增加煤粉制备的困难。

灰分不能燃烧,而且:①阻碍氧气与煤中的可燃质接触,增加燃料着火与燃尽的困难;②灰分是造成结渣、积灰和受热面磨损的根源;③灰分还会造成大气和环境的污染。

由于工业分析成分直接反映了煤在炉内着火与燃烧的难易程度,所以我国动力用煤分类方法和发电用煤分类方法都以煤的工业分析成分作为分类的主要依据。具体分类方法待讲完燃料特性后再介绍。

大纲要求知道煤的工业分析方法,不要求记忆。了解具体方法将便于对本节内容的理解和记忆。你可以在看书累时浏览下述内容作为调节。

这里介绍的煤的工业分析方法是按照国家标准 GB/T212-1996《煤中全水分的测定法》及 GB212-91《煤的工业分析法》规定的常用的方法。

(1)煤中收到基全水分 M_{ar} 的测定。用已知质量浅盘称取粒度 $\leq 13\text{mm}$ 的试样 $G=500\text{g}$ (称准到 0.5g),均匀摊平,放入已加热到 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱内。在不断鼓风的条件下,烟煤干燥 2h ,无烟煤干燥 3h 。取出浅盘,趁热称重(称准到 0.5g)。然后进行检查性干燥,每次 30min ,直到连续两次干燥煤样质量的减少不超过 0.5g (即质量恒重)为止,记为煤样干燥后质量为 G_1 。煤样的收到基全水分 M_{ar} 计算公式为:

$$M_{ar} = \frac{G - G_1}{G} \times 100\% \quad (2-1)$$

(2)煤样的空气干燥基水分 M_{ad} 的测定。使用粒度小于 0.2mm 的实验室空气干燥煤样,称取 $(1 \pm 0.1)\text{g}$,称准至 0.0002g ;平摊在已知质量的小型称量瓶中。打开瓶盖,放进预先加热到 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱内。在不断鼓风的条件下,烟煤干燥 1h ,无烟煤干燥 $1\sim 1.5\text{h}$ 。从干燥箱中取出称量瓶,立即盖上盖,放入干燥器中冷却至室温后称量。然后进行检查性干燥,每次 30min ,直到连续两次干燥煤样质量的减少不超过 0.001g (即质量恒重)为止,记为煤样干燥后

质量为 m_1 。试样质量的减轻量占原试样质量的百分数即为煤样的空气干燥基水分 M_{ad} 。

(3)煤的空气干燥基灰分 A_{ad} 的测定。用已知质量的灰皿称取粒度小于 0.2mm 的实验室空气干燥煤样 $(1 \pm 0.1)\text{g}$,称准至 0.0002g,摊平。放入升温至 $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ 的高温电炉中,灼烧 40min。取出稍冷,放在干燥器内冷却至室温后称重。进行检查性灼烧,每次 20min,直至连续两次灼烧的质量变化不超过 0.001g 为止。灰皿中残留物占原试样质量的百分数即为煤样的空气干燥基灰分含量 A_{ad} 。

(4)煤的空气干燥基挥发分 V_{ad} 的测定。方法是在预先经 900°C 灼烧至恒重的带盖的坩埚中,放进粒度小于 0.2mm 的实验室空气干燥煤样 $(1 \pm 0.01)\text{g}$,称准至 0.0002g,将煤样铺平后加盖,放入预先加热到 920°C 的电炉中,关闭炉门。在 $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ 下准确加热 7min。从炉中取出稍冷,放入干燥器内冷却到室温后称重。减少的质量占煤样质量的百分数,减去水分含量即为空气干燥基挥发分 V_{ad} 。

$$V_{ad} = \frac{G - G_1}{G} \times 100 - M_{ad} \quad (\%) \quad (2-2)$$

(5)空气干燥基固定碳 FC_{ad} 的计算。测定挥发分后的残留物便是焦炭,此时煤中的灰分也残存在焦炭中,将焦炭质量减去灰分的质量,便是固定碳的质量。计算式为:

$$FC_{ad} = 100 - (M_{ad} + A_{ad} + V_{ad}) \quad (\%) \quad (2-3)$$

煤的元素分析成分是供燃烧计算应用。除水分和灰分外,煤的其他成分都将参加燃烧反应,其元素分析成分包括有碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)。加上水分(M)与灰分(A)统称元素分析成分。所以水分和灰分既是工业分析成分,又是元素分析成分。同一分析基准时,两者的数量相同。

从图 2-1 中可以看出,固定碳中全部是元素分析成分碳,而挥发分中包含有碳、氢、氧、氮、硫五种元素分析成分。图中碳的格子最大,表明煤中含量最高的是碳,远比其他元素成分大,碳是煤中热量的主要来源。单位质量氢的发热量虽高,达 120370kJ/kg ,但其含量很少,只在 3%~6%左右,总的发热量不高。硫燃烧的发热量不高,且含量又少,燃烧发出的热量很少,但燃烧产物 SO_2 和 SO_3 会污染环境,及对受热面产生高温腐蚀和低温腐蚀。氧和氮是煤的有机物中的不可燃成分,氧与煤中的碳和氢结合生成 CO_2 和 H_2O 存在煤中,使煤的发热量降低,氮的含量很少,但在燃烧时有部分氮转化为 NO_x (氮氧化物),是污染大气的有害气体。

元素分析成分由实验室专门的元素分析仪器测量。

2.1.2 煤的成分分析基准

为什么要有四种分析基准?随着开采、运输、储存及气候等外界条件的变化,煤中的水分和灰分含量会发生改变。例如,煤被雨淋,或为防煤堆自燃而浇水,或在运输过程中混入了泥土、石块等,都将使煤的总量发生变化,从而使煤的各成分含量也发生变化。为了正确衡量或比较煤的成分含量必须有一个相同的基准,四种成分分析基准有不同的含义及不同的使用场合。煤的成分分析基准的脚码以英文缩写表示。

1. 收到基(as received basis)

$$\text{收到基元素分析成分: } C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\% \quad (2-4)$$

$$\text{收到基工业分析成分: } M_{ar} + V_{ar} + FC_{ar} + A_{ar} = 100\% \quad (2-5)$$

定义:以收到状态的煤为基准计算煤中各组成成分称为收到基。所谓“收到”是指锅炉“收

到”，即送入锅炉参加燃烧的煤。所以在燃料的燃烧计算中采用收到基成分，进入电厂的原煤也采用收到基成分（以前称应用基）。

2. 空气干燥基 (air dried basis)

敞开放置的煤样，随着空气中湿度的减小和放置时间的延长，煤中的外在水分会不断蒸发。在实验室进行煤的工业分析和元素分析时需要将送来的煤样进行粉碎、研磨，并缩制成多份小样品。若在制样过程中煤中水分不断蒸发，则各份小样品之间就没有一个统一的基准。所以送入实验室分析的煤样除取出一部分进行收到基水分分析外，其余煤样在实验室的温度和湿度条件下，自然干燥失去外在水分后，再供分析化验，这时的统一基准就是空气干燥基（旧称分析基）。

空气干燥基元素分析成分：

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\% \quad (2-6)$$

$$\text{空气干燥基工业分析成分: } M_{ad} + V_{ad} + FC_{ad} + A_{ad} = 100\% \quad (2-7)$$

通常将煤样送实验室分析时，先得到空气干燥基元素分析和工业分析成分（包括后面的发热量等），然后换算成收到基、干燥基、无灰干燥基等成分。

3. 干燥基 (dry basis)

干燥基主要是用于比较煤的灰分含量。例如，在淋了一场雨后，煤的水分增加了。同一种煤总量增加，则其收到基灰分含量降低。但其灰分质量没有少，所以在比较煤的灰分时，以没有水分的状态作为统一的基准，就没有这个问题了。这就是干燥基。

$$\text{干燥基元素分析成分为: } C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\% \quad (2-8)$$

$$\text{干燥基工业分析成分为: } V_d + FC_d + A_d = 100\% \quad (2-9)$$

4. 干燥无灰基 (dry ash-free basis)

以假想无水无灰状态的煤为基准来表示煤的工业分析和元素分析成分：

$$V_{daf} + FC_{daf} = 100\% \quad (2-10)$$

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\% \quad (2-11)$$

从上述两式中看出，煤去除水和灰，剩余的就是可以燃烧的物质（旧称可燃基），N 不参加燃烧，但燃烧后 N 变为烟气的一部分，所以也作为可燃质。干燥无灰基各成分的比例，直接反映煤的燃烧特性，所以在进行煤分类时，采用的是干燥无灰基挥发分 V_{daf} 。

2.1.3 各成分分析基准之间的换算

图 2-1 反映了各成分分析基准相互间的定性关系，从图中可以看出，不管是什么基准，除水分之外的其他各成分的质量是不变的，基准不同，则其百分含量不同。同一种煤的各基准成分含量可以相互换算。不同基准之间的换算系数，如教材《电厂锅炉》表 2-1 所示。换算系数可以由下列方法推导，掌握规律，有利记忆，也不易出错，切忌死记硬背。

1. 已知收到基成分，求干燥无灰基成分

$$\text{先将式(2-1)写成: } C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} = (100 - A_{ar} - M_{ar}) \quad (\%) \quad (2-12)$$

$$\text{与式(2-8)比较得到: } \frac{C_{ar}}{100 - A_{ar} - M_{ar}} = \frac{C_{daf}}{100} \quad (2-13)$$

$$\text{则 } C_{daf} = C_{ar} \cdot \frac{100}{100 - A_{ar} - M_{ar}} \quad (\%) \quad (2-14)$$

从式中可知: $100 > (100 - A_{ar} - M_{ar})$, 则 $C_{def} > C_{ar}$, 与实际情况符合。若将换算系数错记成 $\frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$, 则 $C_{def} = C_{ar} \cdot \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$, 计算结果是 $C_{def} < C_{ar}$, 将是错误的。

反过来, 从干燥无灰基换算到收到基则为:

$$C_{ar} = C_{def} \cdot \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100} \quad (\%) \quad (2-15)$$

同理
$$C_d = C_{ar} \cdot \frac{100}{100 - M_{ar}} \quad (\%) \quad (2-16)$$

比较一下式(2-1)、式(2-6)与式(2-8), 再看一看式(2-11)与式(2-13), 就不难发现有利记忆的规律。

2. 已知空气干燥基成分, 求收到基成分

将式(2-1)和式(2-3)改写成: $C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} = 100 - M_{ar}$ (2-17)

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} = 100 - M_{ad} \quad (2-18)$$

则

$$\frac{C_{ar}}{100 - M_{ar}} = \frac{C_{ad}}{100 - M_{ad}}$$

$$C_{ar} = C_{ad} \cdot \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} \quad (\%) \quad (2-19)$$

判别换算系数 $\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$ 是否正确的方法是看计算后的结果 C_{ar} 与 C_{ad} 哪一个大, 煤从收到基状态变为空气干燥基状态时, 水分不断蒸发, 总量变小, 各成分含量变大, 则 $C_{ad} > C_{ar}$, 若计算的结果不对, 则是换算系数的分子分母颠倒了。

其他各成分的换算方法类似。

煤的全水分 M_t 为外在水分 M_f 与内在水分 M_{inh} 之和, M_t 、 M_f 与 M_{inh} 的基准都是收到基, 其中 M_{inh} 为经过自然干燥不能去除的固有水分, 其质量与空气干燥基水分相同, 但两者的基准不同, 所以 M_{inh} 与 M_{ad} 的数值不相等, $M_{inh} < M_{ad}$ 。这是因为计算 M_{inh} 的基准比计算 M_{ad} 的基准大些。它们之间的关系为:

$$M_{inh} = M_{ad} \cdot \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} \quad (\%) \quad (2-20)$$

2.2 煤的主要特性

2.2.1 发热量

煤的发热量: 1kg 煤完全燃烧所释放出的热量, Q , kJ/kg。

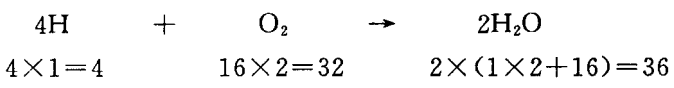
高位发热量: 1kg 煤完全燃烧所放出的全部热量, 包括烟气中水蒸气的潜热(即燃烧生成的水蒸气全部凝结放出热量), Q_{gr} , kJ/kg。

低位发热量: 1kg 煤完全燃烧所放出的全部热量扣除烟气中水蒸气的潜热(即所有的水蒸气都不凝结, 不放出汽化潜热), Q_{net} , kJ/kg。

所以,
$$Q_{net, ad} = Q_{gr, ad} - 2510 \left(\frac{9H_{ad}}{100} + \frac{M_{ad}}{100} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-21)$$

煤燃烧后产生的水蒸气由两部分组成: 一部分是煤中的水分 M 蒸发, 另一部分是煤中的

氢(H)燃烧生成的水蒸气。式中括号内为总的水蒸气量。烟气中水蒸气的潜热等于水的汽化潜热(2510kJ/kg)乘以水蒸气量(kg)。



由上式可知,煤中的氢燃烧后将生成 9 倍质量的水蒸气,所以式中为 $\frac{9H_{ad}}{100}$ 。

以上是同一基准煤的高位与低位发热量的换算方法,由于实验室分析时为空气干燥基,所以首先得到的也是空气干燥基高位发热量。锅炉的排烟温度通常大于 100℃,燃烧生成的水蒸气没有凝结就排入大气,所以锅炉利用的是煤燃烧产生的热量扣除水蒸气的潜热后的热量,即利用的是低位发热量。

注意:由于同一种煤的水分 M 与氢(H)在不同基准时有不同的数值,因此在进行低位发热量的不同基准之间的换算时,需先换算成高位发热量后再进行换算。例如,为将空气干燥基低位发热量换算成收到基低位发热量,必须先将 $Q_{net,ad}$ 换算成 $Q_{gr,ad}$,再换算成 $Q_{gr,ar}$,然后换算成 $Q_{net,ar}$,即:

$$Q_{gr,ad} = Q_{net,ad} + 2510 \left(\frac{9H_{ad}}{100} + \frac{M_{ad}}{100} \right)$$

(2-22)

$$Q_{gr,ar} = Q_{gr,ad} \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} \text{ (与元素成分的基准换算相似)}$$

(2-23)

$$Q_{net,ar} = Q_{gr,ar} - 2510 \left(\frac{9H_{ar}}{100} + \frac{M_{ar}}{100} \right)$$

(2-24)

由于式(2-21)中具有加、减项,所以在含有水分的收到基和空气干燥基低位发热量之间不能直接换算,需换算成各自的高位发热量,然后再换算成低位发热量。不同基准的低位发热量之间的换算公式如表 2-1 所列。

表 2-1 不同基准的低位发热量的换算公式

所 求 已 知	要换算到的“基”			
	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	—	$(Q_{net,ar} + 25.1M_{ar}) \times \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} - 25.1M_{ad}$	$(Q_{net,ar} + 25.1M_{ar}) \times \frac{100}{100 - M_{ar}}$	$(Q_{net,ar} + 25.1M_{ar}) \times \frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$(Q_{net,ad} + 25.1M_{ad}) \times \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} - 25.1M_{ar}$	—	$(Q_{net,ad} + 25.1M_{ad}) \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$	$(Q_{net,ad} + 25.1M_{ad}) \times \frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$Q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 25.1M_{ar}$	$Q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ad}}{100} - 25.1M_{ad}$	—	$Q_{net,d} \times \frac{100}{100 - A_d}$