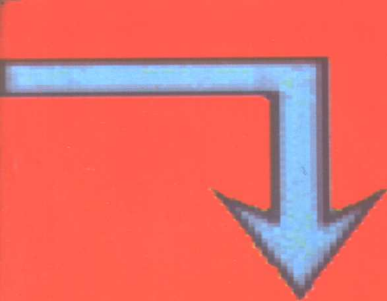




煤 燃烧

理论与技术

路春美 王永征 编著



地震出版社

煤燃烧理论与技术

路春美 王永征 编著

地震出版社

2001

图书在版编目(CIP)数据

煤燃烧理论与技术/路春美,王永征编著. —北京:地震出版社,2001.11

ISBN 7-5028-1976-2

I. 煤… II. ①路…②王… III. 煤-燃烧 IV. TQ534

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 076191 号

煤燃烧理论与技术

路春美 王永征 编著

责任编辑:宋炳忠

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: Seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 山东山大科苑印刷厂印刷

版(印)次: 2001 年 11 月第一版 2001 年 11 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 327 千字

印张: 12.75

印数: 0001~1000

书号: ISBN 7-5028-1976-2/TD·13 (2527)

定价: 22.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,但专门介绍煤燃烧方面的书籍较少。在热能工程及相近学科中,“煤的燃烧与利用”、“燃煤污染产物控制技术”、“燃烧理论及其应用”等主要专业方向中都涉及到煤的燃烧问题。为此,《煤燃烧理论与技术》作为专业课教材列入山东大学热能工程学科教材建设计划,作者在原《煤燃烧理论》(自编讲义,由路春美、邵延龄、许炳松编写)的基础上,重新改编、调整,并增加了煤燃烧技术方面的内容,本着加强基础知识、拓宽专业知识面的宗旨,进行了教材的修订、编写工作。

本书共分七章,主要内容包括:煤的基本性质、煤燃烧反应动力学基础、煤的着火理论、煤中挥发分的析出与焦炭的异相燃烧、煤燃烧中火焰的传播与稳定性、煤的燃烧方式与新兴燃煤技术、燃煤污染物的形成与控制技术等。

本书主要作为热能与动力工程专业研究生、本科生的教学用书,同时也可作为电力、热电、冶金、化工等行业从事煤燃烧与热能利用的广大工程技术人员的参考用书。

本书由山东大学能源与动力工程学院路春美教授、王永征副教授编写。第一章第一节至第三节、第四章、第六章、第七章由路春美编写,其余章节由王永征编写。

本书由邵延龄副教授担任主审;姜荣太师傅绘制了本书的大部分插图,研究生潘新元、赵建立、毕见重、张雷同学完成了本书的部分文字、图表及公式编辑等工作。编者对他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限,错误和不当之处恳请读者批评指正。

编 者
2001 年 9 月

目 录

第一章 煤的基本性质	(1)
第一节 煤的成分与表示方法	(1)
第二节 煤的分析	(4)
第三节 煤的分类	(9)
第四节 煤的理论燃烧温度	(12)
第二章 煤燃烧化学反应动力学基础	(16)
第一节 化学反应的分类	(16)
第二节 化学反应速率及其方程式	(18)
第三节 反应级数	(19)
第四节 Arrhenius 定律及活化能的概念	(24)
第五节 反应速率的理论	(26)
第六节 影响化学反应速率的因素	(29)
第七节 链锁反应	(34)
第八节 氢、一氧化碳和碳氢化合物的燃烧反应	(38)
第三章 煤的着火理论	(46)
第一节 热自燃理论	(47)
第二节 链锁自燃理论	(55)
第三节 点燃理论	(58)
第四章 煤粒的燃烧	(68)
第一节 煤粒的燃烧过程	(68)
第二节 煤粒的热分解	(69)
第三节 碳粒燃烧的异相化学反应速度	(73)
第四节 碳粒的动力扩散燃烧区	(75)
第五节 碳粒的燃烧反应机理与燃尽时间	(79)
第六节 碳的气化反应及其对燃烧的影响	(87)
第七节 焦炭的燃烧	(92)
第五章 煤燃烧中火焰的传播与稳定性	(96)
第一节 层流火焰的传播	(96)
第二节 湍流火焰的传播	(107)
第三节 火焰的稳定性	(115)
第六章 煤的燃烧方式与技术	(125)
第一节 煤的层状燃烧	(125)
第二节 流化床燃烧	(136)
第三节 煤的悬浮燃烧	(148)

第四节 煤的其他燃烧技术简介..... (158)

第七章 燃煤污染物的形成与控制..... (167)

 第一节 氮氧化物的形成机理与控制技术..... (167)

 第二节 硫氧化物的形成机理与控制技术..... (179)

 第三节 烟尘的生成机理与控制技术..... (190)

参考文献..... (197)

第一章 煤的基本性质

煤是棕色至黑色的可燃固体。它是由植物经过物理、化学演变沉积而成的。这种沉积常常在沼泽地或潮湿的环境中进行，最初植物逐渐腐烂风化形成泥浆或泥煤，随后经过埋藏沉积及相应的地质过程(包括压力、温度的增高等)便演变成煤。

第一节 煤的成分与表示方法

一、煤的成分

煤是由多种有机可燃质、不可燃的无机矿物质(灰质与灰分)及水分混合而成的。

1. 有机可燃质

煤中的可燃质是多种复杂的高分子有机化合物的混合物。主要包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)元素的化合物，它们与氧气发生燃烧反应时放出热量。故称煤中的 C、H、O、N、S 及其化合物为可燃质。

(1) 碳。

碳是煤中的主要可燃成分。1 kg 碳完全燃烧释放约 33 858 kJ 热量。碳元素的着火点很高。一般煤中的碳含量越高，着火越困难。煤中的碳以与氢、氧、氮、硫组成有机化合物的状态存在。煤的形成年代愈长，碳元素含量愈高。

(2) 氢。

氢是煤中仅次于碳的可燃成分。1 kg 氢完全燃烧时释放约 125 400 kJ 热。煤中含氢量约 2% ~ 8%，碳化程度越高，含氢量越低。含碳氢化合物多的煤易着火，但含重碳氢化合物多的煤在供氧不足的燃烧过程中燃烧不充分，易形成炭黑，既造成燃烧损失，又污染大气。

(3) 氮和氧。

煤中氮含量约为 1% ~ 2%。在高温下氮与 O_2 发生反应，产生 NO_2 或 NO ，排入大气后，在光的作用下产生有害气体。但在较低温度(低于 800 $^{\circ}C$)下，氮与 O_2 反应生成的 NO_x 显著下降，主要呈游离氮气(N_2)状态。

氧不能燃烧释放热量，但仍将它列为有机成分，实际上氧为燃料内部杂质。煤中含氧量随着煤种不同变化范围很大。地质年代高的煤含氧量低，相反则高。如无烟煤中含氧 1.2% 左右。泥煤中含氧达 40%。

(4) 硫。

硫是燃料中最有害的可燃元素。硫在燃烧后会生成 SO_2 与 SO_3 气体，这些气体与燃烧产物中的水蒸汽结合，形成对燃烧装置金属表面有严重腐蚀作用的亚硫酸和硫酸蒸气。 SO_2 与 SO_3 排入大气还会形成酸雨。我国煤的含硫量大约为 0.5% ~ 3%，有少数煤超过 3%。

煤中的硫常以三种形式存在，即存在于有机物中的有机硫 S_{yj} ，黄铁矿硫 S_{hk} 和硫酸盐硫 S_{ly} (有时有微量的元素硫 S_n)，三者合称全硫 S_q 。其中 S_{yj} 、 S_{hk} 、 S_n 可参与燃烧，放出热量，

故计入燃料可燃质中，称可燃硫 S_r ， S_{ly} 不参与燃烧而计入燃料灰质之中。我国煤中 S_{ly} 很少，可忽略不计，一般可用煤中全硫分析时测出的 S_q 代表 S_r 。

2. 灰分与灰质

灰质指煤中的不可燃矿物杂质，它们中一部分在燃料煤的形成过程中混杂进来，另一部分是在煤开采、运输和贮存过程中由外界带入的。直接测定灰质含量比较困难，通常是测定煤在燃烧后形成的固体残渣量。这种残渣被称为灰分，它是煤在燃烧时，灰质经高温分解和氧化后形成的。因此，灰质与灰分在组成上和数量上并不相同。

各种煤的灰分含量差别较大，一般为 5% ~ 50%。灰分主要成分为 $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。各种氧化铁(FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4)， CaO ， MgO 及 K_2O ， Na_2O 等。由于煤的灰分较高，因此，对其发热量有较大影响，由此而引起燃烧装置堵塞、磨损、恶化传热等问题，这给设备的维护与运行增加了困难。煤中的灰分还影响其着火与燃烧。因此，煤灰分的高低是评价煤质优劣的主要依据。

灰分在低温下呈固体状态，当加热至一定温度时，灰分将会软化并带有粘性，再继续加热将达到灰分熔点，这时灰分将呈流体状态。

3. 水分

水分是煤中的不可燃杂质，煤中水分含量较高，且碳化程度不同的煤水分含量差别很大。从技术角度考虑，常将煤中所含水分 M 划分为外在水分 M_1 与内在水分 M_2 。 M_1 指煤和空气达到湿度平衡时失去的水分占初始煤重的百分比，它可用自然干燥的方法去除。 M_1 随运输和储存条件变动很大。 M_2 指吸附于煤块内部的水分，它需在干燥箱中加热到 102 ~ 105 °C 并持续 1 ~ 2 h 才能去除。 M_2 的含量比较稳定。至于存在于煤中矿物杂质内部的结晶水，则计入前述的化合氢之中，它需加热到更高温度才能去除，因其含量很少，分析时一般不予考虑。

二、煤的成分表示方法

即使是同一种煤，由于所处的条件不同，其碳、氢、氧、氮、硫、水分、灰分质量百分数也不同。煤的元素成分有下列几种表示方法：

1. 收到基或应用基成分（以下角标 ar 表示）

以炉前煤试样（粒径 3 ~ 13 mm）质量为基数，各成分用质量百分数表示的成分称煤的收到基成分。进行煤的燃烧产物计算时要求用煤的收到基成分资料。

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + M_{ar} + A_{ar} = 100 \quad (\%) \quad (1-1)$$

2. 空气干燥基或分析基成分（以下角标 ad 表示）

以实验室条件(20 °C，相对湿度 60%)下自然风干的煤粉试样(粒径 < 0.2 mm)质量为基数，各成分分别用质量百分数表示的成分称为煤的空气干燥基成分(或称分析基)。进行煤的元素分析、工业分析以及发热量等测定时，其试样要求用煤的空气干燥基试样。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + M_{ad} + A_{ad} = 100 \quad (\%) \quad (1-2)$$

3. 干燥基成分（以下角标 d 表示）

以在烘箱中(102 ~ 105 °C)烘干后失去全部水分(外部水分及内部水分)的煤粉试样(粒径小于 0.2 mm)质量为基数，各成分分别用质量百分数表示的成分称为干燥基成分。它表征了煤的稳定成分，故可利用此成分对不同煤的质量进行比较：

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100 \quad (\%) \quad (1-3)$$

4. 干燥无灰基或可燃基成分(以下角标 daf 表示)

以不计入水分、灰分煤的质量为基数，各成分分别用质量百分数表示的成分称为干燥无灰基成分(或称可燃基)。

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100 \quad (\%) \quad (1-4)$$

三、不同基煤的成分换算

煤中各种基成分间的关系见图 1-1。在进行煤燃烧计算时，常需在各种基成分之间进行换算。如煤质特性常用比较稳定的干燥无灰基成分表示，但在进行燃烧计算时却又需按收到基成分计算，这时就需将煤的无灰基成分进行转换。

由于 $C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} = 100 - A_{ar} - M_{ar}$

而 $C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100$

所以 $\frac{C_{ar}}{C_{daf}} = \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$

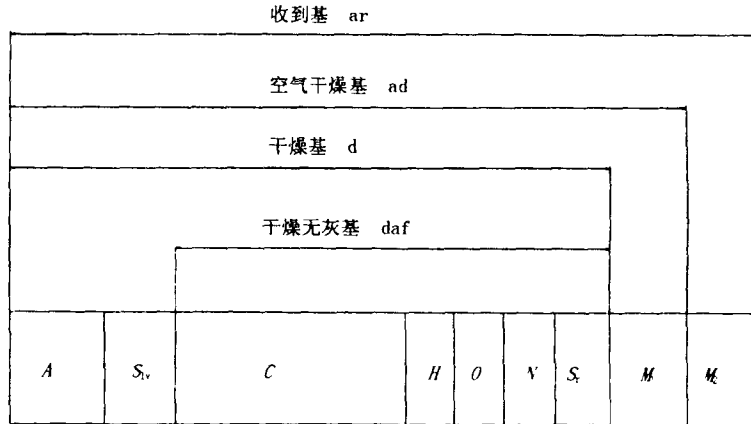


图 1-1 燃料各种基成分间的关系

$$\frac{H_{ar}}{H_{daf}} = \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$$

.....

即

$$C_{ar} = C_{daf} \times \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$$

$$H_{ar} = H_{daf} \times \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$$

.....

可以看出：上式中的 $\frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100}$ 即由干燥无灰基成分换算为收到基成分的换算关系。只要求出换算关系即可进行换算。表 1-1 中给出了各种基间的换算关系。

表 1-1 煤各种基成分的换算系数

给 所 求 基	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$
干燥基	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100 - A_d}{100}$
干燥无灰基	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$	$\frac{100}{100 - A_d}$	1

注：表中以系数为 1 的对角线为界线，右上部分系数的值小于 1，左下部分系数的值大于 1。注意收到基水分和空气干燥基水分不可换算，它们由实验测定。

第二节 煤的分析

煤的分析有元素分析、工业分析两种。元素分析是分析煤的碳 C、氢 H、氧 O、氮 N、硫 S 五种元素占煤的质量百分比，为此也必须分析煤的灰分和水；工业分析是分析煤的水分 M 、挥发分 V 、灰分 A 和固定碳 C_F 占煤的质量百分数及煤的发热量 Q 、灰熔点测定、煤的颗粒度测定等。本节主要介绍煤元素分析与工业分析的基本原理或基本方法。

一、煤元素分析的基本原理

煤的元素分析一般在煤的研究、管理机构进行。

1. 煤中碳、氢含量的测定

煤的元素分析方法通常是将煤中的碳、氢两种元素同时进行分析。此法称 800 °C 燃烧法（利比西法）。其原理是将盛有定量煤样的瓷盘置于燃烧管中，通入氧气，在 800 °C 温度下使煤充分燃烧，煤中碳和氢加热至 800 °C 时，在有氧化铜存在的条件下完全转化为 CO_2 和 H_2O 。用吸水剂（氯化钙、浓硫酸或氯酸镁）和 CO_2 吸收剂（碱石棉、钠石灰或 40% 氢氧化钾溶液）分别吸收。根据吸收剂的增重计算煤中碳和氢的百分含量。

2. 煤中氮含量的测定

煤中氮元素的测定通常用开氏法。其原理是将煤与浓硫酸在催化剂作用下使煤中有机质（C、H、O、N、S）氧化成 CO_2 ， H_2O ， NH_3 等。其中氨（ NH_3 ）再与浓硫酸（ H_2SO_4 ）作用形成硫酸氢氨（ NH_4HSO_4 ）。当加入过量氢氧化钠（NaOH）中和硫酸后，氨又能从氢氧化钠中蒸馏出来，由硼酸（ H_3BO_3 ）吸收，最后用硫酸滴定。由硫酸滴定耗量计算氨量。最后即可求出氮元素。滴定终点 pH 值约为 5.4。

3. 煤中硫含量测定

煤中全硫的测定采用艾氏卡法。用艾氏混合剂，即碳酸钠和氧化镁混合，与煤慢速度灼

烧。加入氧化镁能够防止碳酸钠在较低温度下熔化。煤样和混合剂保持疏松状态以增加空气与煤样接触面积。煤在慢速灼烧过程中逐渐氧化成 CO_2 , H_2O , SO_2 , SO_3 以及 N_2 , 其中硫的氧化物再与碳酸钠作用转化成亚硫酸钠及硫酸钠。亚硫酸钠与空气中氧作用又转化成硫酸钠。此外, 硫氧化物也可能直接与氧化镁作用生成硫酸镁与亚硫酸镁, 亚硫酸镁与空气中氧反应生成硫酸镁。煤中的硫酸钙等也将与碳酸钠进行复杂分解转化反应, 生成硫酸钠。反应物加热水溶解, 在一定酸度下加入氯化钡溶液, 使可溶性硫酸盐全部转化成硫酸钡沉淀。称量硫酸钡即可计算出煤中全硫。

4. 煤中含氧量的求定

煤中含氧量随着煤种不同变化范围很大。煤中含氧量目前亦没有直接测定方法, 一般通过减差法计算。即在已测定煤样中碳、氢、氮、硫、水分和灰分质量百分比的情况下, 可按下式计算:

$$\text{O} = 100 - (\text{C} + \text{H} + \text{N} + \text{S} + \text{M} + \text{A}) \quad (\%) \quad (1-5)$$

二、煤工业分析的基本方法

煤的元素分析并不能反映煤在燃烧时的某些性质(如焦结性, 点燃性等)。煤的挥发物在燃烧过程中对煤的着火影响很大, 高挥发分煤着火迅速, 燃烧稳定, 燃烧时有长的火焰, 可燃质的燃烧主要在炉膛空间进行。低挥发分的煤不易着火, 燃烧时火焰短, 可燃质的燃烧主要在炉篦上进行(流化床燃烧时在沸腾层中进行), 炉篦的热负荷大, 燃料层温度高, 炉篦常被烧坏。焦结性(焦炭粘结性)差的煤末易被气流吹出, 燃料层不能燃尽, 造成较大的飞灰未完全燃烧热损失; 而强焦结性煤因煤渣堵塞煤层空隙使之不易通风, 也会恶化燃烧。这些都说明, 应该有一种能够从应用角度要求来表征煤的某些特点的分析, 该分析称为煤的工业分析。煤的工业分析内容包括分析煤的水分、挥发分、灰分以及固定碳。并对灰渣观察, 作出对灰熔点的判断。

1. 水分的测定

(1) 外在水分 M_1 的测定: 取 200 g (精确至 0.1 g) 试样放入 45 ~ 50 °C 烘箱内干燥 8 h, 取出后自然冷却至室温, 然后称重。煤干燥后失去的质量占煤样原有质量的百分比即外在水分。

(2) 空气干燥基水分的测定: 取 1 g (精确至 0.001 g) 分析试样放入去盖的坩埚置于干燥箱内。对烟煤及无烟煤在 105 ~ 110 °C 下干燥 1 ~ 1.5 h; 褐煤在 140 ~ 150 °C 下干燥 1 h。然后将坩埚取出加盖, 放入干燥器中冷却至室温后迅速称量。然后去盖再次放入干燥箱内干燥, 并加盖冷却后再称量。如此重复上述过程, 直至所称质量不再变化为止(干燥 30 min, 质量减少小于 0.01 g)。这时失去的质量占分析试样原有质量的百分比即为空气干燥基水分。

2. 挥发分的测定

测定挥发分的试样一般采用预先破碎至小于 0.2 mm, 并使它达到空气自然干燥状态, 按标准缩取后精确称取 1 ± 0.01 g。在分析褐煤及长焰煤时, 为了避免因试样爆燃而造成的损失, 应将试样用压饼机先压成饼, 然后再破碎成 3 mm 以下的粒度, 称取试样放入坩埚中。将装有试样并加盖的坩埚放于坩埚架上, 迅速将架推到已预先加热到 920 °C 的马弗炉稳定温度区内, 关闭炉门, 使试样在炉中加热 7 min。装有若干个坩埚的坩埚架开始放入马弗炉时, 炉温往往稍有下降, 但在 3 min 内必须使炉温达到 $(900 \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C})$ 的要求。否则, 这次试验就

要作废。加热 7 min 后，迅速将坩埚架从炉内取出，在空气中冷却 5 min，再将坩埚从架上取下放入干燥器中冷却到室温(约 20~30 min)，然后称重，挥发分含量按下式计算：

$$V_{ad} = \frac{\Delta G}{G} \times 100 - M_{ad} \quad (\%) \quad (1-6)$$

式中， ΔG 为空气干燥基试样受热减轻的质量，g； G 为空气干燥基试样的质量，g； M_{ad} 为空气干燥基试样的水分含量，%。

3. 灰分的测定

灰分测定有缓慢灰化和快速灰化两种方法。对某一矿区的煤，快速灰化法须经缓慢灰化法反复校核，证明误差不大时方可使用。但快速法不能作仲裁用，故仅对缓慢灰化法进行介绍。缓慢灰化法步骤如下：称取小于 0.2 mm 的空气干燥基煤样 1 ± 0.1 g，放入已恒重的灰皿，摇动摊平后移入温度不超过 100 °C 的马弗炉中。如与水分联测，则把测定水分后装有煤样的瓷皿放入炉中。把炉门打开约 15 mm，在 30 min 内使炉温升到 500 °C。并保持 30 min，然后继续升温到 815 ± 10 °C。关闭炉门并在此温度下灼烧 1 h。取出灰皿，冷却 5 min 后，移入干燥器冷却到室温后称重。以后进行每次为 20 min 的检查性灼烧，直到质量变化小于 0.001 g 为止。取最后一次质量作为计算的依据。灰分小于 15% 时不进行检查性灼烧。测定结果按下式计算：

$$A_{ad} = \frac{G_1}{G} \times 100 \quad (\%) \quad (1-7)$$

式中， G_1 为试样灼烧后残渣的质量，g； G 为空气干燥基煤试样的质量，g。

4. 固定碳含量的求定

根据测定的水分、灰分、挥发分含量，然后按下式计算煤的固定碳含量：

$$C_{F,ad} = 100 - (M_{ad} + V_{ad} + A_{ad}) \quad (\%) \quad (1-8)$$

式中， $C_{F,ad}$ 为空气干燥基试样的固定碳含量，(%)； M_{ad} ， V_{ad} ， A_{ad} 为空气干燥基试样的水分，挥发分，灰分。

5. 灰熔点的测定

煤的灰熔点与煤中矿物质成分及煤在燃烧成渣部位的气氛有关。煤灰中的主要成分有 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 K_2O 、 Na_2O 等。故煤的灰熔点为不同矿物质的共熔点，其数值只能靠实验测定。

实验室测定灰熔点之前，把灰粉碎后胶结并压制成药锥烘干，置于还原性或半还原性介质(通以 CO 、 CO_2 或 CH_4 、 H_2 等气体)的马弗炉中加热。观察三个不同温度下的灰锥形态。如图 1-2 所示，(b)、(c)、(d) 分别为变形温度 T_d 、软化温度 T_s 、流动温度 T_f 所对应的形态。以 T_d 、 T_s 、 T_f 三个温度作为煤的产品性质(挥发性，发热量，灰熔点，元素分析)之一。变形温度 T_d 为灰角锥尖顶变圆和倾斜时所测温度；软化温度 T_s 为锥尖端弯到底边时所测温度，工业上一般以 T_s 作为衡量灰的熔

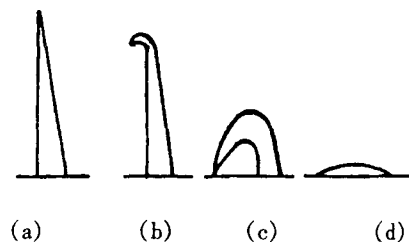


图 1-2 灰熔点测试示意图

(a) 未加热的试样；(b) 开始变形温度 T_d ；
(c) 开始软化温度 T_s ；(d) 开始流动温度 T_f

融性的主要指标；流动温度 T_f 为灰已熔化、沿底边开始自由流动时所测温度。

$T_s < 1473 \text{ K}$ 称为易熔性灰； $T_s = (1473 \sim 1698) \text{ K}$ 称为可熔性灰； $T_s > 1698 \text{ K}$ 称为难熔性灰。燃煤装置的炉膛出口烟气温度应保证 $\theta_1 \leq T_s - 150 \text{ K}$ 。对一般煤种 $\theta_1 = 1343 \text{ K}$ 。

三、煤的发热量与换算关系

煤的高位发热量是指每 kg 煤完全燃烧后能够产生的热量。它包括燃烧产物(烟气)中水分的汽化潜热。煤的低位发热量是指从高位发热量中扣除了水蒸汽的汽化潜热的热量。煤的发热量一般是通过实验测定的。实验条件下测定的发热量与高位发热量或低位发热量并不相等。

1. 煤发热量的求定

(1) 弹筒发热量(实验发热量)的计算。

$$Q_{\text{ad,gr,v}} = \frac{KH [(t_n + h_n) - (t_0 + h_0) + C - \Delta t] - (q_1 + q_2)}{G} \quad (\text{J/g}) \quad (1-9)$$

式中, $Q_{\text{ad,gr,v}}$ 为空气干燥基试样的弹筒发热量, J/g (kJ/kg); K 为热量计的热容量(又称水当量), J/°C; 对于每台热量计该值预先标定; H 为贝克曼温度计的平均分度值, 即温度计上每一度相当于实际温度的度数; t_n 为终点时的内筒温度, °C; t_0 为点火时的内筒温度, °C; h_0 为相应点火温度 t_0 的读数修正值; h_n 为相应终点温度 t_n 的读数修正系数值; C 为冷却校正, °C; Δt 为试验期间由于室温有显著变化引起温度计露出柱的膨胀或收缩而对温度读数的修正值(°C), 若室温无显著变化, 此修正值可视为 0; q_1 为点火丝在通电时所放出的热量, J; q_2 为棉线燃烧时所放出的热量, J; G 为试样质量, g。

(2) 高位发热量 $Q_{\text{ad,gr,p}}$ 的计算。

$$Q_{\text{ad,gr,p}} = Q_{\text{ad,gr,v}} - (94S_{\text{ad,gr,v}} + \alpha Q_{\text{ad,gr,v}}) \quad (\text{J/g}) \quad (1-10)$$

式中, $Q_{\text{ad,gr,p}}$ 为空气干燥基试样的高位发热量, J/g; $S_{\text{ad,gr,v}}$ 为由弹筒洗液测得的煤的含硫量, %; α 为硝酸校正系数, 贫煤和无烟煤取 0.0010, 其他煤取 0.0015; 94.0 为煤中每 1% 硫的校正值, J/0.01 g。

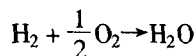
当煤中全硫含量 $S_{\text{ad,q}}$ 低于 4% 时, 或发热量大于 14 630 J/g 时, 可用煤中全硫 $S_{\text{ad,q}}$ 代替 $S_{\text{ad,gr,v}}$, 为简便也可用下式计算:

$$Q_{\text{ad,gr,p}} = Q_{\text{ad,gr,v}} - (15V - 1.5\alpha Q_{\text{ad,gr,v}}) \quad (\text{J/g}) \quad (1-11)$$

式中, V 为液流中 0.1 N 总酸量的体积。具体步骤见杨金和等主编的《煤炭化验手册》(1998 年版)。

2. 相同基高位发热量与低位发热量的换算

某种煤的高、低位发热量的差别仅在于水蒸汽吸取的汽化潜热。考虑到烟气中水蒸汽由两部分水分组成, 即燃料中固有的水分及氢元素化合而成的水分。对后者由下列化学反应



可知, 1 kg 氢气燃烧后产生 9 kg 水, 故 1 kg 燃料燃烧后产生 $\left(9 \frac{H}{100} + \frac{M}{100}\right)$ kg 水。式中 H , M 分别为燃料中氢元素质量百分数及水分质量百分数。若每 kg 水的汽化潜热在常压下近似取 2 508 kJ, 则相同基高(gr)、低(net)位发热量的关系为:

$$Q_{\text{net,p}} = Q_{\text{gr,p}} - 2508 \left[9 \frac{H}{100} + \frac{M}{100} \right]$$

$$= Q_{\text{gr,p}} - (226 H + 25 M) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-12)$$

对于收到基燃料，高、低位发热量的关系为：

$$Q_{\text{ar,net,p}} = Q_{\text{ar,gr,p}} - (226 H_{\text{ar}} + 25 M_{\text{ar}}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-13)$$

对于空气干燥基燃料，高、低位发热量的关系为：

$$Q_{\text{ad,net,p}} = Q_{\text{ad,gr,p}} - (226 H_{\text{ad}} + 25 M_{\text{ad}}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-14)$$

对于干燥基燃料，高、低位发热量的关系为：

$$Q_{\text{d,net,p}} = Q_{\text{d,gr,p}} - 226 H_{\text{d}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-15)$$

3. 不同基高位发热量的换算

不同基高位发热量之间的换算关系实际上为不同基燃料成分之间的换算关系。其换算关系如表 1-2。

表 1-2 不同基高位发热量的换算

给定基 所求基	$Q_{\text{ar,gr,p}}$	$Q_{\text{ad,gr,p}}$	$Q_{\text{d,gr,p}}$	$Q_{\text{daf,gr,p}}$
$Q_{\text{ar,gr,p}}$	$Q_{\text{ar,gr,p}}$	$Q_{\text{ad,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$	$Q_{\text{d,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100}$	$Q_{\text{daf,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}{100}$
$Q_{\text{ad,gr,p}}$	$Q_{\text{ar,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ad}}}{100 - M_{\text{ar}}}$	$Q_{\text{ad,gr,p}}$	$Q_{\text{d,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ad}}}{100}$	$Q_{\text{daf,gr,p}} \frac{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}{100}$
$Q_{\text{d,gr,p}}$	$Q_{\text{ar,gr,p}} \frac{100}{100 - M_{\text{ar}}}$	$Q_{\text{ad,gr,p}} \frac{100}{100 - M_{\text{ad}}}$	$Q_{\text{d,gr,p}}$	$Q_{\text{daf,gr,p}} \frac{100 - A_{\text{d}}}{100}$
$Q_{\text{daf,gr,p}}$	$Q_{\text{ar,gr,p}} \frac{100}{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}$	$Q_{\text{ad,gr,p}} \frac{100}{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}$	$Q_{\text{d,gr,p}} \frac{100}{100 - A_{\text{d}}}$	$Q_{\text{daf,gr,p}}$

4. 不同基低位发热量的换算

由于相同基的低位发热量与高位发热量有一定的关系(考虑到水分、氢元素的影响)，而不同基的高位发热量之间又有一定的关系(即应考虑水分、氢元素以及灰分的影响)。经推导可知，不同基低位发热量之间的换算系数如表 1-3。

5. 利用煤元素分析测试数据计算煤的发热量

当只有煤的元素分析数据而无发热量的测定数据时，可根据元素分析计算燃料发热量(门捷列也夫公式)：

$$Q_{\text{daf,net,p}} = 339 C_{\text{daf}} + 1028 H_{\text{daf}} - 109 (O_{\text{daf}} - S_{\text{daf}}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-16)$$

$$Q_{\text{d,net,p}} = 339 C_{\text{d}} + 1028 H_{\text{d}} - 109 (O_{\text{d}} - S_{\text{d}}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-17)$$

$$Q_{\text{ad,net,p}} = 339 C_{\text{ad}} + 1028 H_{\text{ad}} - 109 (O_{\text{ad}} - S_{\text{ad}}) - 25 M_{\text{ad}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-18)$$

$$Q_{\text{ar,net,p}} = 339 C_{\text{ar}} + 1028 H_{\text{ar}} - 109 (O_{\text{ar}} - S_{\text{ar}}) - 25 M_{\text{ar}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-19)$$

式中 C , H , O , S , M 皆为相应基的成分百分数。

该式也可用于检验元素分析及发热量实测值的准确性。

表 1-3 不同基低位发热量的换算

给定基 所求基	$Q_{ar,gr,p}$	$Q_{ad,net,p}$	$Q_{d,net,p}$	$Q_{daf,net,p}$
$Q_{ar,net,p}$	$Q_{ar,net,p}$	$(Q_{ad,net,p} + 25M_{ad}) \times \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} - 25M_{ar}$	$Q_{d,net,p} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 25M_{ar}$	$Q_{daf,net,p} \times \frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100} - 25M_{ar}$
$Q_{ad,net,p}$	$(Q_{ar,net,p} + 25M_{ar}) \times \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} - 25M_{ad}$	$Q_{ad,net,p}$	$Q_{d,net,p} \times \frac{100 - M_{ad}}{100} - 25M_{ad}$	$Q_{daf,net,p} \times \frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100} - 25M_{ad}$
$Q_{d,net,p}$	$(Q_{ar,net,p} + 25M_{ar}) \times \frac{100}{100 - M_{ar}}$	$(Q_{ad,net,p} + 25M_{ad}) \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$	$Q_{d,net,p}$	$Q_{daf,net,p} \times \frac{100 - A_d}{100}$
$Q_{daf,net,p}$	$(Q_{ar,net,p} + 25M_{ar}) \times \frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$	$(Q_{ad,net,p} + 25M_{ad}) \times \frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$	$Q_{d,net,p} \times \frac{100}{100 - A_d}$	$Q_{daf,net,p}$

第三节 煤的分类

根据不同的需要，煤有不同的分类方法。

一、按碳化程度分类

根据煤的碳化程度，可将煤分为泥煤、褐煤、烟煤及无烟煤四大类。表 1-4 和表 1-5 是这四类煤的元素组成和水分含量。

表 1-4 不同煤种的元素成分含量(%)

煤种	C	H	O	N	S
泥煤	60~70	5~6	25~35	1~3	0.3~0.5
褐煤	70~80	5~6	15~25	1.3~1.5	0.2~0.35
烟煤	80~90	4~5	5~15	1.2~1.7	0.3~0.4
无烟煤	90~98	1~3	1~3	0.2~1.3	0.4

1. 泥煤

泥煤是碳化程度最低，最年青的煤。在结构上它还保留有植物遗体的痕迹，质地疏松，

吸水性强，含天然水分高达 40% 以上。风干后体积密度为 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 。与其他煤种相比，泥煤含氧量最高(达 28% ~ 30%)，含碳量较低；挥发分高，可燃性好，反应活性高。另外它含硫低，机械性差，灰分熔点很低，可用作锅炉燃料和气化原料。由于不便长途运输，只能作地方性燃料使用。

表 1-5 煤的水分含量(%)

煤 种	泥 煤	褐 煤	烟 煤	无烟煤
原煤水分含量	60 ~ 90	30 ~ 60	4 ~ 15	2 ~ 4
风干后水分含量	40 ~ 50	10 ~ 40	1 ~ 8	1 ~ 2

2. 褐煤

褐煤是泥煤经过进一步碳化后生成的。它的体积密度 $750 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 。含碳量较高，氢和氧含量较少，极易氧化和自燃，吸水性较强。在空气中易风化和破碎，只能作地方性燃料。

3. 烟煤

烟煤是一种碳化程度较高的煤种，与褐煤相比挥发分较少，密度较大，吸水性较小，含碳量增加，氢和氧的含量较低。烟煤是工业上的主要燃料，也是化学工业的重要原料。烟煤的最大特点是具有粘结性，这是其他固体燃料所没有的，因此是炼焦的主要原料。当然并非所有的烟煤都具有粘结性，也不是所有有粘结性的煤都适合于炼焦，对炼焦的煤要有一定的选择。我国根据煤的粘结性及挥发性大小等物理化学性质进一步把烟煤分为长烟煤、气煤、肥煤、结焦煤、瘦煤等不同的品种。其中长烟煤和气煤挥发分含量高，容易燃烧和适合于制造煤气。结焦煤具有良好的结焦性，适合于生产冶金焦炭。

4. 无烟煤

无烟煤是碳化程度最高的煤，也是年龄最老的煤，其特点是密度大，含碳量高，挥发分低，组织密实、坚硬，吸水性小，适合于长途运输、长期贮存。其缺点是可燃性差，不易着火，但发热量大(约 $29\,300 \text{ kJ/kg}$)，灰分少，含硫低，分布广。无烟煤是很重要的燃料。

二、动力用煤分类

1. 电厂用煤的 VAWST 分类标准

为了能更合理地利用煤炭资源，为了给燃煤电站锅炉调配质量适宜的煤种。以利于设计新的、改造旧的电站锅炉，1983 年我国提出了发电厂用煤的 VAWST 分类标准，其中五个字母的意义如下：

V 为干燥无灰基挥发分 V_{daf} ；A 为干燥基灰分 A_d ；W 为收到基水分 M_{ar} ；S 为干燥基全硫 $S_{\text{d,q}}$ ；T 为软化温度 T_s 。

具体分类标准见表 1-6。

2. 工业锅炉用煤分类

工业锅炉中为了使产品系列化，将煤分成了 11 类。具体分类标准见表 1-7。

表 1-6 发电厂用煤的 VAWST 分类标准

分 类 指 标	分级界限	辅 助 分 类 指 标 (或代用分类标准)	等级代号	煤 种 名 称
干燥无灰基挥发分 $V_{\text{daf}} \times 100$	≤ 6.5	$Q_{\text{ar,net,p}} > 23 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_0	超低挥发分无烟煤
	$> 6.5 \sim 9$	$Q_{\text{ar,net,p}} > 20.9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_1	低挥发分无烟煤
	$> 9 \sim 19$	$Q_{\text{ar,net,p}} > 18.4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_2	低中挥发分贫煤
	$> 19 \sim 27$	$Q_{\text{ar,net,p}} > 16.3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_3	中挥发分烟煤
	$> 27 \sim 40$	$Q_{\text{ar,net,p}} > 15.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_4	中高挥发分烟煤
	> 40	$Q_{\text{ar,net,p}} > 11.7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	V_5	高挥发分烟煤、褐煤、油页岩
折算收到基灰分 $A^Z = \frac{418.7A_{\text{ar}}}{Q_{\text{ar,net,p}}} \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$	≤ 7	或 $A_{\text{ad}} \leq 34\%$	A_1	常灰分煤
	$> 7 \sim 13$	$A_{\text{ad}} > 34\% \sim 45\%$	A_2	高灰分煤
	> 13	$A_{\text{ad}} > 45\%$	A_3	超高灰分煤
收到基水分 $M_{\text{ar}} \times 100$	≤ 22	$V_{\text{daf}} > 40\%$	W_1	常水分煤
	> 22		W_2	高水分煤
	> 22		W_3	超高水分煤
外在水分 $M_2 \times 100$	≤ 8	$V_{\text{daf}} \leq 40\%$	W_1	常水分煤
	$> 8 \sim 12$		W_2	高水分煤
	> 12		W_3	超高水分煤
折算收到基硫分 $S^Z = \frac{418.7S_{\text{ar}}}{Q_{\text{ar,net,p}}} \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$	≤ 0.2	或 $S_{\text{ad}} \leq 1\%$	S_1	低硫煤
	$> 0.2 \sim 0.55$	$S_{\text{ad}} > 1\% \sim 2.8\%$	S_2	中硫煤
	> 0.55	$S_{\text{ad}} > 1\% \sim 2.8\%$	S_3	高硫煤
灰软化温度 $T_g / ^\circ\text{C}$	> 1350	$Q_{\text{ar,net,p}} > 12.6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($Q_{\text{ar,net,p}} \leq 12.6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 T_g 不限)	T_{2-1}	不结渣煤
	< 1350	$Q_{\text{ar,net,p}} > 12.6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	T_{2-2}	易结渣煤

表 1-7 工业锅炉行业煤的分类

类 别		干燥无灰基挥发分 $V_{\text{daf}} / \%$	收到基低位发热量 $Q_{\text{ar,net,p}} / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
石 煤	I 类		≤ 5434
	II 类		$5434 \sim 8360$
煤矸石	III 类		$> 8360 \sim 11286$
褐 煤		> 40	$11286 \sim 14630$
无 烟 煤	I 类	$5 \sim 10$	$14630 \sim 20900$
	II 类	< 5	> 20900
	III 类	$5 \sim 10$	> 20900
贫 煤		$10 \sim 20$	≥ 18810
烟 煤	I 类	$20 \sim 40$	$> 11286 \sim 15466$
	II 类		$> 15466 \sim 9646$
	III 类		> 19466