

燃料与燃烧概论

胡震岗 黄信仪 编

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书从锅炉设计的热力辅助计算和锅炉运行中热试验要求出发,阐述了锅炉燃料和燃烧过程中必要的概念和计算方法。为了实际应用的需要,书中内容顺序与锅炉设计的热力辅助计算要求基本一致。全书分四章,第一章着重介绍不同的锅炉燃料种类和燃料发热量及其不同基的换算方法;第二章介绍燃料燃烧产物的计算方法;第三章介绍锅炉运行中各项热损失的计算及锅炉热效率的测试方法;第四章介绍煤粉制备的热力计算方法。

本书可作为热能工程专业本科生的教科书,也适用于热能专业的技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃料与燃烧概论/胡震岗,黄信仪编. —北京:清华大学出版社, 1995
ISBN 7-302-01799-9

. 燃... . 胡... 黄... . 燃料-锅炉燃烧-概论 .TK 16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02883 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

责任编辑: 金文织

印 刷 者: 北京昌平环球印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 9.75 字数: 232 千字

版 次: 1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01799-9/TK · 22

印 数: 0001—3000

定 价: 8.60 元

前 言

“燃料与燃烧概论”作为清华大学热能工程系“锅炉课程设计”课的前期课程设立已有多年了。本课程着重介绍计算锅炉的设计热效率和测定实际运行锅炉热效率的方法。为此首先介绍了锅炉所用燃料的特性,燃料不同基的换算方法,以及燃料发热量的实验测定方法等。

与本课程相配合还开设了包括煤的工业分析,煤的发热量测定,烟气成分分析等实验,以及在运行的锅炉上进行锅炉热平衡的测定,以培养学生把所学的理论用于生产实践的动手能力。

本书所列举的某些例题及其计算中,有目的地结合锅炉设计热力计算的部分内容,有助于了解锅炉热力计算格式及计算中项目的先后安排次序。附录中列举了数台不同类型的工业锅炉热效率测试报告,有助于掌握锅炉热工测试的规范方法。

由于编者水平有限,错误之处望请读者批评指正。

目 录

| | |
|---|---------|
| 第一章 燃料 | (1) |
| 第一节 煤的化学成分及其热化学方程 | (1) |
| 第二节 煤的元素分析 | (2) |
| 第三节 煤的成分的几种表示方法及不同基成分的换算 | (6) |
| 第四节 煤的工业分析 | (10) |
| 第五节 煤炭发热量的测定 | (22) |
| 第六节 燃料发热量的换算 | (24) |
| 第七节 燃料的分类 | (30) |
| 第二章 燃料燃烧产物的计算 | (43) |
| 第一节 概述 | (43) |
| 第二节 理论空气容积的计算 | (47) |
| 第三节 理论烟气容积的计算 | (49) |
| 第四节 实际烟气容积的计算 | (51) |
| 第五节 烟气在各受热面烟道中的平均特征值 | (51) |
| 第六节 烟气焓与烟气焓温表 | (52) |
| 第三章 燃料燃烧装置的热平衡和热效率 | (72) |
| 第一节 燃料燃烧装置的物质平衡 | (72) |
| 第二节 燃料燃烧装置的热平衡 | (73) |
| 第三节 燃料燃烧装置的热效率 | (75) |
| 第四节 关于燃烧产物测试中的几个问题 | (80) |
| 第四章 煤粉制备 | (84) |
| 第一节 磨煤方法和煤的可磨性系数 | (84) |
| 第二节 煤粉的性质 | (87) |
| 第三节 磨煤机 | (101) |
| 第四节 制粉系统 | (112) |
| 第五节 制粉系统的热力计算 | (114) |
| 附录 1 出力为 6t/h 的快装水火管链条炉排锅炉的热工测试结果 | (132) |
| 附录 2 出力为 4t/h 的双锅筒纵置式组装水管锅炉的热工测试结果 | (135) |
| 附录 3 出力为 10t/h 的卧式内燃三回程湿背式燃油锅炉的热工测试结果 | (138) |
| 附录 4 蒸发量 6t/h 的沸腾燃烧锅炉设计结构特性及辅助设备综合表 | (141) |
| 附录 5 蒸发量 6t/h 沸腾燃烧锅炉热工试验综合表 | (143) |
| 参考文献 | (147) |

主要符号及单位表

| | |
|------|-----------------------------|
| A | 燃料工业分析中的灰分, % |
| a | 飞灰或炉渣中纯灰量占燃料灰分份额% |
| B | 燃料消耗量, kg/h |
| D | 锅炉蒸发量, kg/h |
| D | 滚筒直径, m |
| D | 煤粉筛分中通过筛子量, % |
| d | 空气或烟气的含水量, g |
| DT | 灰开始变形温度, |
| E | 能耗, kW · h/kg |
| FC | 燃料工业分析中的固定碳, % |
| F | 面积(烟道流通截面积), m ² |
| FT | 熔化温度, |
| G | 灰量, kg/h |
| G | 渣量, kg/h |
| g | 干燥剂, g |
| H GI | 哈氏可磨度 |
| I | 焓, kJ/kg |
| i | 工质(水、蒸汽)焓, kJ/kg |
| K | 可磨性系数 |
| M | 燃料工业分析中的水分, % |
| P | 压力, Pa |
| Q | 燃料发热量, kJ/kg |
| q | 热损失, % |
| R | 煤粉筛分中筛上残余量, % |
| r | 汽化潜热, kJ/kg |
| r | 一、二、三、次风的份额, % |
| ST | 灰开始软化温度, |
| T | 热力学温度, K |
| V | 容积, m ³ |
| V | 燃料工业分析中的挥发分, % |
| W | 原燃料工业分析中的水分, % |

角 标

| | | | |
|--------|-------|------|---------|
| ad | 收到基 | ar | 空气干燥基 |
| b | 弹筒 | bq | 饱和汽 |
| bs | 饱和水 | DW | 低位 |
| d | 干燥基 | daf | 干燥无灰基 |
| dh | 电耗 | dj | 电机 |
| dt | 弹筒 | dw | 电网 |
| f | 分析基 | f | 粉 |
| f | 反平衡 | fh | 飞灰 |
| fhh | 飞灰化 | fhw | 飞灰物 |
| fj | 附加 | g | 干基 |
| g | 干燥 | gd | 固定 |
| gh | 固体化 | gl | 锅炉 |
| gk | 干空气 | gk | 给入空气 |
| gq | 钢球 | gr | 过热 |
| gr, p | 定压高位 | gt | 固体未完全燃烧 |
| gy | 干烟气 | gz | 干燥剂 |
| hj | 护甲 | hr | 化学潜热 |
| hzh | 灰渣 | j | 计算 |
| j | 净 | jsh | 金属耗 |
| jr | 加热 | jy | 净烟 |
| jyh | 净烟化 | jyw | 净烟物 |
| k | 空气 | kk | 给入空气 |
| kkw | 给入空气物 | km | 可磨性 |
| kyr | 空气预热器 | l | 炉膛 |
| l | 临界 | lf | 漏风 |
| lk | 冷空气 | llk | 漏入冷空气 |
| lh | 落灰 | l | 离心 |
| ls | 硫酸盐 | lt | 硫铁矿 |
| lzh | 漏渣 | m | 磨煤 |
| mf | 煤粉 | mj | 磨煤计算 |
| ms | 磨损 | nm | 碾磨 |
| net, p | 恒压低位 | pj | 平均 |
| ps | 预破程度 | pw | 排污 |
| py | 排烟 | pzh | 排渣 |
| pzhh | 排渣化 | pzhw | 排渣物 |

| | | | |
|-----|---------|-----|-------|
| q | 全部 | qb | 汽包 |
| qt | 气体未完全燃烧 | r | 燃烧 |
| r | 热 | r | 汽化潜热 |
| rk | 热空气 | rh | 燃料化 |
| rw | 燃料物 | sr | 散热 |
| shk | 湿空气 | shm | 省煤器 |
| tf | 通风 | TS | 焦渣 |
| tt | 筒体 | wb | 外壁 |
| wj | 无机 | wr | 物理热 |
| xh | 细灰 | xs | 吸收 |
| y | 烟气 | yj | 有机 |
| yk | 烟气中空气 | ym | 原煤 |
| ys | 元素 | yx | 有效 |
| yxx | 有效吸收 | z | 重力 |
| zd | 传动 | zhf | 蒸发 |
| zh | 渣 | zj | 最佳 |
| zs | 折算 | zx | 再循环介质 |

第一章 燃 料

第一节 煤的化学成分及其热化学方程

煤的化学成分为有机质、矿物质灰分及水分。

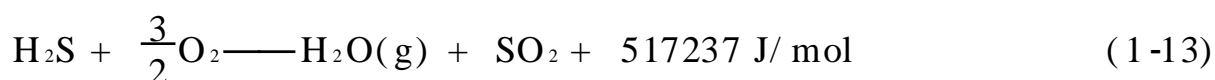
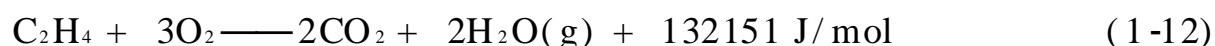
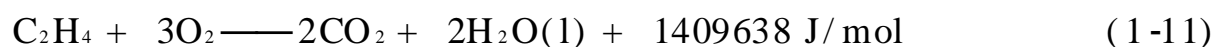
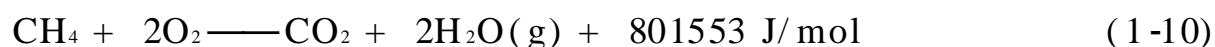
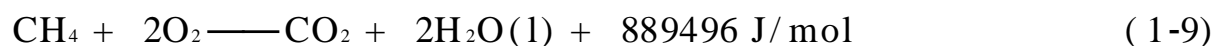
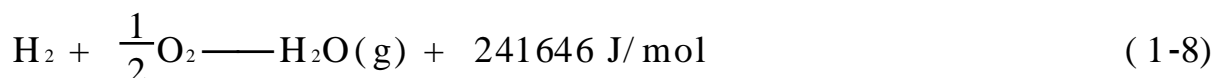
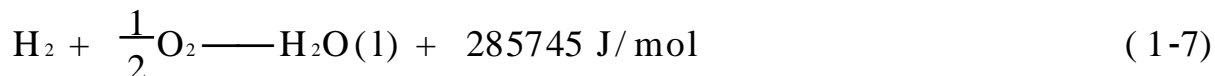
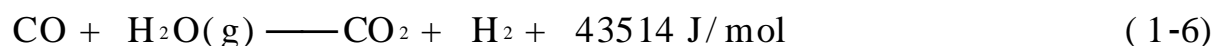
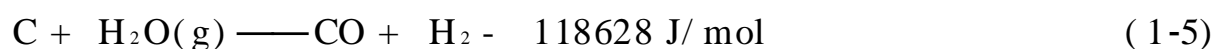
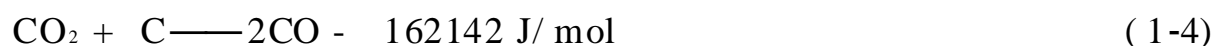
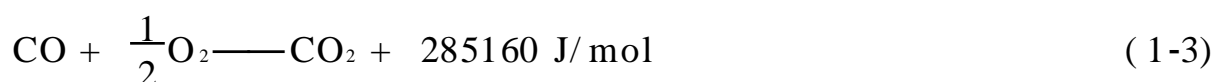
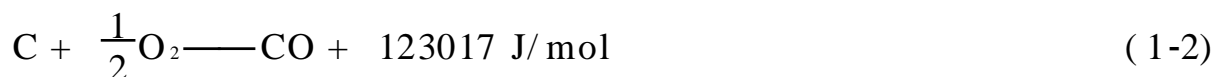
有机质主要包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)元素的化合物。上述元素在与氧气发生燃烧反应时放出热量,故 C, H, O, N, S 及其化合物又称可燃质。

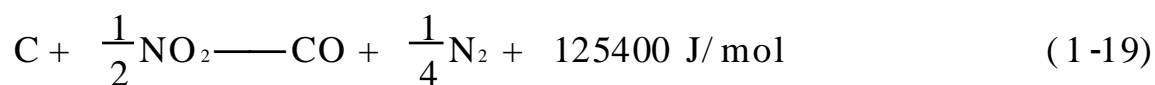
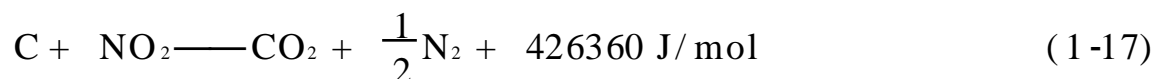
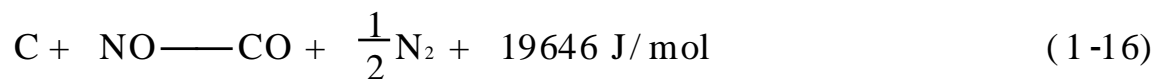
矿物质灰分主要包括钙、镁、铁等金属盐,金属氧化物,微量氯化物以及微量氯元素。如硫酸钙,硫酸亚铁,硫酸镁,碳酸钙,碳酸镁;氧化硅,氧化铝,氧化钙,氧化亚铁,氧化铁;稀有金属氧化物如氧化钛,氧化锰,氧化钒;碱土金属氧化物如氧化钾,氧化钠等。

水分分为化合结晶水及游离水。化合结晶水在低于 100 时不析出;游离水吸附于煤的表面或毛细孔中,吸收热量时可析出。

矿物质灰分及水分不发生化学反应,不产生热量,故对作为燃料的煤而言皆为杂质。

可燃质并非以元素形式存在,而是复杂的化合物,与氧发生燃烧反应时产生一系列的化合、分解反应,伴随热量的释放。其值可通过化学计量方程式表示,它仅表示反应物与生成物之间的数量变化关系,而与反应的实际历程无关。可燃质元素及其化合物的热化学计量方程式如下:





第二节 煤的元素分析

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数; 为此, 也必须分析煤的灰分和水分。煤的元素分析在煤的研究、管理机构进行; 工业分析是分析煤的水分 M、挥发分 V、灰分 A、固定碳 FC 占煤的质量百分数以及煤的发热量 Q、焦渣特性鉴定、灰熔点测定、煤的颗粒度测定等。煤的工业分析可在煤的使用单位进行, 并作发热量测定。煤的工业分析方法将于下一节介绍。在这一节仅将煤的元素分析方法作原理性说明。

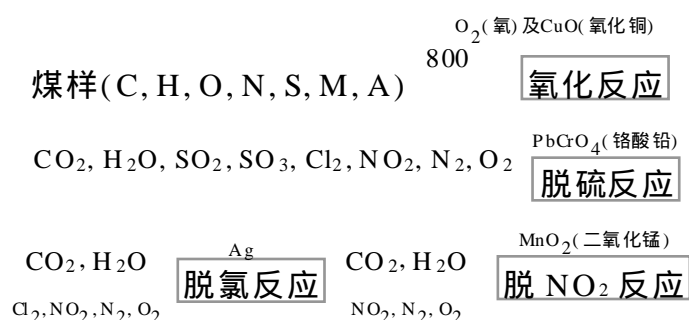
一、煤中碳、氢含量测定原理

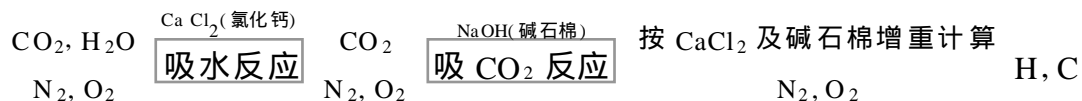
碳是燃料的主要可燃成分, 1kg 碳完全燃烧释放 33858kJ 热。碳元素的着火点很高, 故燃料中含碳量越多(如无烟煤)在炉子中愈不易着火。然而燃料中的碳并非完全以单质元素形式存在, 一般与氢 H、氮 N、硫 S 等元素组成有机化合物。煤的形成年代愈长, 碳元素含量愈高。若以煤中可燃性成分质量为 100%, 则植物纤维中含碳为(44—50)%, 泥煤中含碳(50—60)%; 褐煤中含碳(60—77)%, 无烟煤中含碳(90—98)%。

氢是燃料中仅次于碳的可燃成分, 1kg 氢完全燃烧时释放约 125400kJ 热。煤中含氢(2—8)%, 重油含氢(12—13)%。含碳氢化合物多的燃料易着火, 但含重碳氢化合物多的燃料在供氧不足的燃烧过程中燃烧不充分, 易形成炭黑, 既造成燃料损失, 又污染大气。

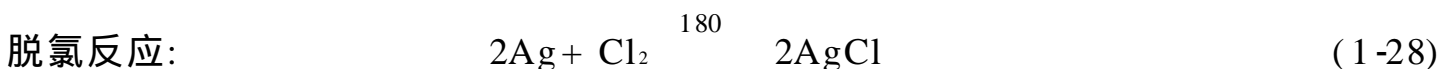
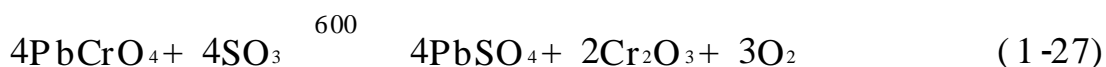
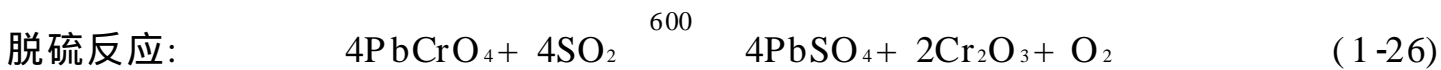
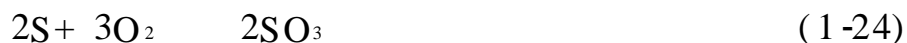
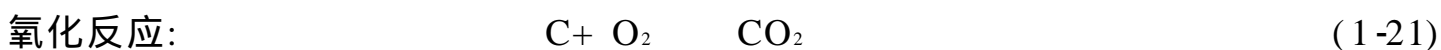
煤的元素分析方法通常是将煤中的碳、氢两种元素同时进行分析。此法称 800 燃烧法(又称利比西法)。其原理是将盛有定量煤样的瓷盘置于燃烧管中, 通入氧气, 在 800 温度下使煤充分燃烧。煤中碳和氢加热至 800 时, 在有氧化铜存在的条件下完全转化为 CO₂ 和 H₂O。用吸水剂(氯化钙、浓硫酸或过氯酸镁)和 CO₂ 吸收剂(碱石棉、钠石灰或 40% 氢氧化钾溶液)分别吸收。根据吸收剂的增重计算煤中碳和氢的百分含量。

用下列框图表示这一反应过程较为明了。符号 C, H, O, N, S, M, A 分别为煤中碳、氢、氧、氮、硫、水、灰分。

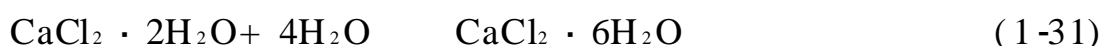




几个化学反应式如下:



脱氯目的是因为 CO₂ 吸收剂(NaOH)亦吸收 Cl₂, 以避免其增重偏高。



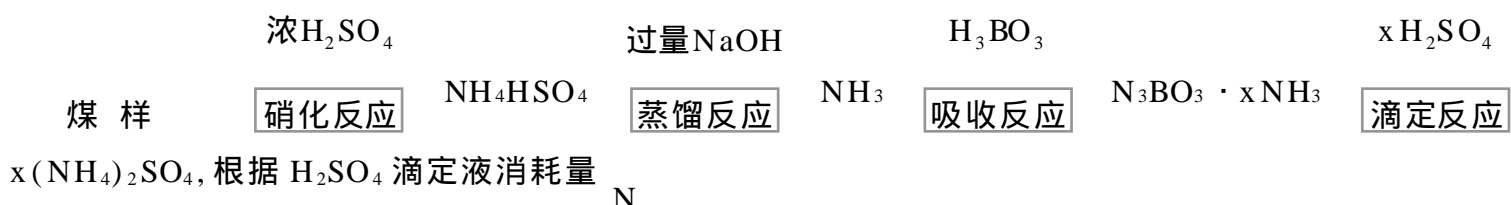
根据吸水剂氯化钙及吸收 CO₂ 的碱石棉的增重、扣除煤样中水的质量, 可分别计算出试样中氢、碳含量。

对于含碳酸盐 > 2% 的煤, 考虑碳酸盐分解释出 CO₂ 使煤中 CO₂ 偏高, 应给予校正。

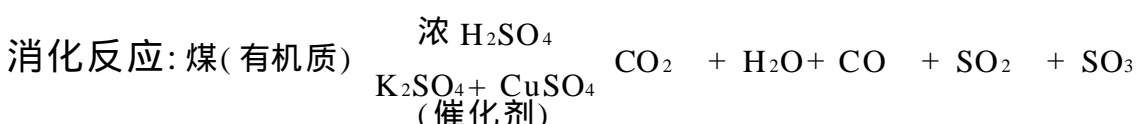
二、煤中氮含量测定原理

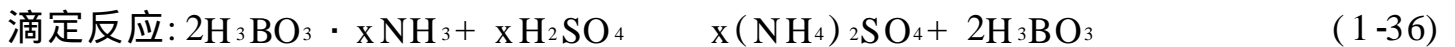
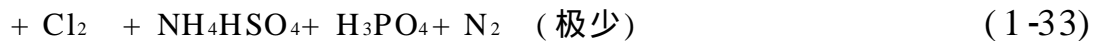
煤中氮主要由成煤植物中蛋白质转化而来, 含量约(1~2)%。在高温下氮与 O₂ 发生燃烧反应, 产生 NO₂ 或 NO。统称 NO_x。NO_x 排入大气, 在光的作用下对人体有害。氮在较低温度下(800)与 O₂ 燃烧反应时产生的 NO_x 显著下降, 亦有不与 O₂ 进行化学反应而呈游离氮气 N₂ 状态。在锅炉热力计算中计算煤的燃烧产物时, 近似地认为煤中氮元素最后只以氮气形式析出。

煤中氮元素的测定通常按开氏法。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 CO₂, H₂O, NH₃ 等。其中氨(NH₃)再与浓硫酸(H₂SO₄)作用形成硫酸氢铵(NH₄HSO₄)。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(H₃BO₃)吸收, 最后用酸滴定, 计算求出煤中氮含量:



其中,





由硫酸溶液滴定消耗量计算氨量,最后即可求出氮元素。滴定终点 pH 值约为 5.4。

三、煤中硫含量测定原理

硫是煤中可燃成分之一,但也是有害的成分。1kg 硫完全燃烧释热 9033kJ,燃烧产物为 SO_2 , SO_3 气体。这些气体与烟气中水蒸汽相遇化合成亚硫酸 H_2SO_3 , 硫酸 H_2SO_4 , 在一定温度下凝结在锅炉尾部金属受热面上,使之腐蚀;它们排入大气对人体、植物也都有害。我国的煤含硫(0—8)%,个别地区的煤中含 $\text{S} > 10\%$ 。含硫量 $> 2\%$ 的煤被认为是高硫煤,一般煤含硫(0.2—1)%。燃烧高硫煤应采取措施以防止大气污染。大型电厂的煤粉锅炉采用从烟气中脱硫方法,设备庞大,投资约占电厂总投资的 1/4。采用流化床燃烧技术并加入石灰石或白云石作脱硫剂设备较简单,脱硫效果亦佳。目前各国都在深入研究各种脱硫的方法,推广应用流化床燃烧脱硫方法。我们教研组在脱硫研究方面已取得重大进展,并已获国家发明奖。

煤中硫可分为有机硫和无机硫两类。从燃烧角度上亦可将它们分为可燃硫或称挥发硫和固定硫或称不可燃硫两类。

有机硫是指煤中与 C、H、O 形成有机化合物的硫。煤中有机硫含量极微。无机硫包括硫化物硫、元素硫以及硫酸盐硫。硫化物硫主要指黄铁矿硫 FeS_2 、微量闪锌矿硫 ZnS , 方铅矿硫 PbS , 黄铜矿硫 $\text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{CuS}$, 砷黄铁矿硫 $\text{FeS} \cdot \text{FeAs}_2$ 。硫酸盐硫主要指硫酸钙 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (即石膏),以及微量硫酸亚铁 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (即绿矾)和微量 MgSO_4 。

将有机硫、无机硫中的硫化物硫和元素硫称可燃硫。它们燃烧后以 SO_2 , SO_3 气态形式存在于烟气中。将无机硫中的硫酸盐硫称固定硫。因它不可燃烧,最后仍以固态形式留在煤灰中。

我国煤中的硫酸盐硫含量很少,一般所谓煤中全硫,若不特别说明即指可燃硫,即有机硫和主要为硫铁矿硫的无机硫。

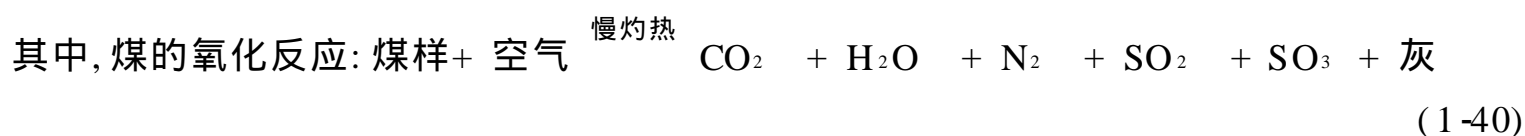
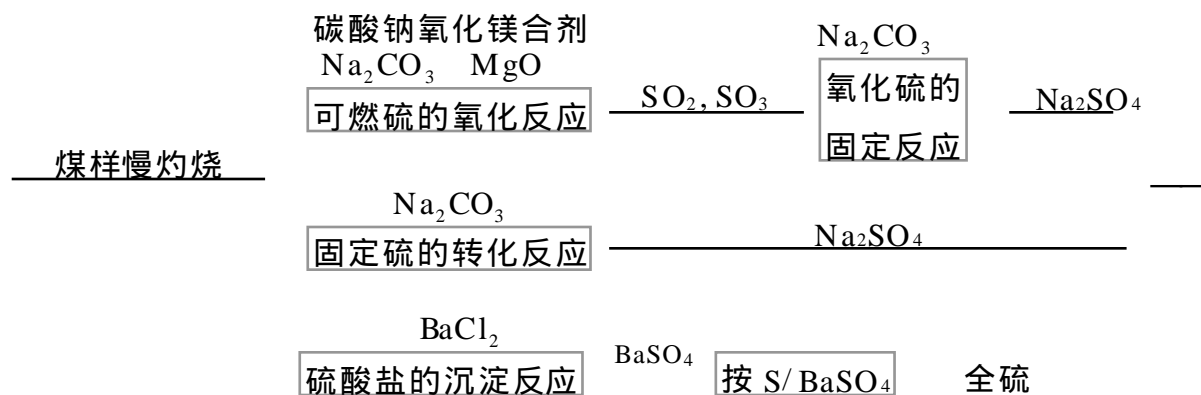
值得注意的是煤燃烧后灰渣中的硫酸盐硫比煤中原硫酸盐硫的含量高。因为煤中一般含有少量碳酸钙 CaCO_3 ,它受热后分解成氧化钙和二氧化碳气体。煤中可燃硫燃烧后产生 SO_2 , SO_3 气体,它们与 CaO 分别发生化学反应后又生成硫酸钙,即



流化床燃烧脱硫就是利用上述反应以达到脱硫效果。测定煤渣中硫酸钙的增量就可分析石灰石的脱硫程度。

煤中全硫的测定采用艾士卡方法。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。煤样与混合剂应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 气, 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, 前者与空气中氧作用又转化成硫酸钠。此外, 硫的氧化物也可能直接与氧化镁作用生成硫酸镁与亚硫酸镁, 后者与空气中氧作用氧化成硫酸镁。至于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。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。

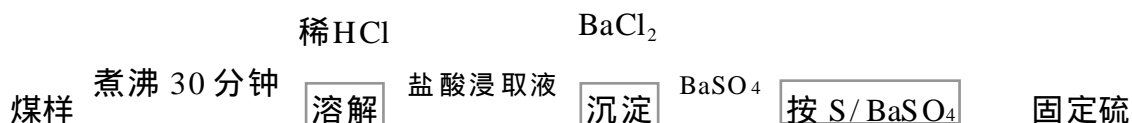


按上法测定的是煤中全硫含量。一般煤的元素分析不要求分别测定煤中有机硫和无机硫含量。目前尚无直接测定有机硫的方法, 通常根据硫分平衡式计算:

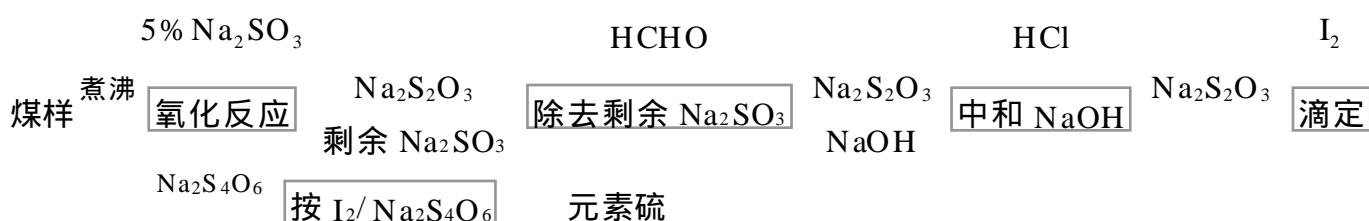
$$S_{yj} = S_q - S_{wj} = S_q - (S_{lt} + S_{ys} + S_{ls}) \quad (1-47)$$

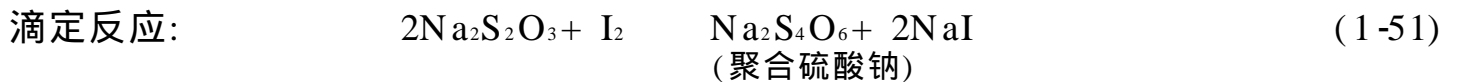
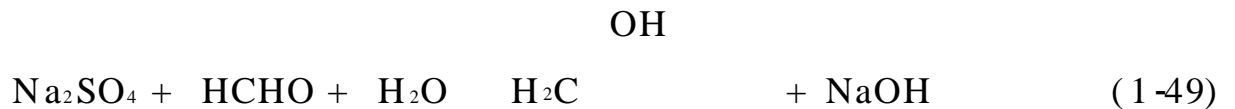
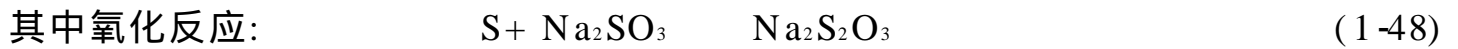
由于硫在不同化合物中性质不同, 如:

故硫酸盐硫($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 石膏), 硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 绿矾)在稀盐酸作用下可测得。即将煤样与稀盐酸混合煮沸, 过滤得到盐酸浸取液, 在一定酸度下加入氯化钡溶液后产生硫酸钡沉淀, 根据沉淀量可计算出硫酸盐含量。



元素硫的测定是将一定量煤样(3—5g)加 5% 亚硫酸钠(Na_2SO_3)煮沸, 则煤中元素硫转化为硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)。滤出煤样, 滤液用甲醛 HCHO 掩蔽多余的亚硫酸钠, 用酸中和生成的氢氧化钠, 然后用碘(I_2)滴定。根据消耗的碘量可计算出煤中元素硫含量。





煤中硫化物硫绝大部分均以硫铁矿 FeS_2 形态存在, 故常把硫化物硫简称硫铁矿硫。硫铁矿硫的测定是用稀硝酸 HNO_3 将煤中硫铁矿硫都氧化成硫酸盐, 然后扣除用前已介绍求定的硫酸盐硫, 即可计算出硫铁矿硫。

煤的元素分析资料中硫的成分只是可燃硫, 若不特别说明, 不包括固定硫。

四、煤中含氧量求定

氧不能燃烧释放热量, 但仍将它列为有机成分, 实为燃料内部杂质。煤中氧含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。煤中氧含量目前亦没有直接测定方法, 仅靠减差法计算。即在已测定燃料试样中碳、氢、氮、硫、水分 M 以及灰分 A 质量百分数情况下, 按下式计算:

$$O = 100\% - (C + H + N + S + M + A) \quad (\%)$$
 (1-52)

第三节 煤的成分的几种表示方法及不同基成分的换算

一、煤的成分表示方法

即使是同一种煤, 由于所处的条件不同, (如干湿程度等条件不同), 它的碳、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:

以炉前煤试样(颗粒 3—13mm) 质量为基数, 各成分用质量百分数表示的成分称为煤的收到基成分(或应用基成分)。进行煤的燃烧产物计算要求用煤的收到基成分资料。

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + M_{ar} + A_{ar} = 100 \quad (\%)$$
 (1-53)

角标 ar 为收到基的符号。

以实验室条件(20℃, 相对湿度 60%) 下自然风干的煤粉试样(颗粒 < 0.2mm) 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)。煤的元素分析、工业分析以及发热量等测定试验的试样都要求煤的空气干燥基试样。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + M_{ad} + A_{ad} = 100 \quad (\%)$$
 (1-54)

角标 ad 为空气干燥基符号。

以在烘箱中(102—105℃) 烘干后失去全部水分(外部水分及内部水分) 的煤粉试样(颗粒小于 0.2mm) 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。

本书将% 作为单位。

它表征了煤的稳定成分,故可对不同煤的质量进行比较。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100 \quad (\%) \quad (1-55)$$

角标为 d 为干燥基符号。

以不计入水分、灰分的煤的质量为基数,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)。

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100 \quad (\%) \quad (1-56)$$

角标 daf 为干燥无灰基符号。

二、不同基煤的成分换算

如前所述,即使对于同一种煤,由于它所处的条件不同,其中同一成分的数值并不相等,比如一定数量的同一种煤,水分较多时则含碳较少。不同基煤的成分换算应乘以换算系数。

1. 由收到基成分换算到空气干燥基成分,换算系数为 $\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$ 。

设 1kg 收到基煤经破碎至 0.2mm 颗粒并自然风干后得到 $x (< 1)$ kg 空气干燥基煤样。但它们各自具有的干质应相等,即:

$$1 \times \frac{100 - M_{ar}}{100} = x \frac{100 - M_{ad}}{100} \quad (1-57)$$

故
$$x = \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} \quad (1-58)$$

根据成分定义,如求出收到基含碳量 C_{ar} ,则

$$C_{ad} = \frac{\frac{C_{ar}}{100}}{\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}} \times 100 = C_{ar} \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} \quad (\%) \quad (1-59)$$

故知,由收到基含碳量换算到空气干燥基含碳量应乘换算系数 $\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$ 。

其他成分的收到基与空气干燥基之间的换算系数相同,亦即 x 的倒数。但必须注意,收到基水分和空气干燥基水分不可换算,它们由实验测定。

2. 由收到基成分换算到干燥基成分,换算系数为 $\frac{100}{100 - M_{ar}}$ 。

设 1kg 收到基煤经破碎至 0.2mm 颗粒并在(102—105) 烘干后得到 $X (< 1)$ kg 干粉,但它们各自具有的干质应相等,即

$$1 \times \frac{100 - M_{ar}}{100} = X \quad (1-60)$$

故
$$X = \frac{100 - M_{ar}}{100} \quad (1-61)$$

根据成分的定义,与上一小节的讨论相同,可得由收到基成分换算到干燥基成分的换算系数为 x 的倒数,即 $\frac{100}{100 - M_{ar}}$ 。

3. 由收到基成分换算到干燥无灰基成分,换算系数为 $\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$ 。

设 1kg 收到基煤扣除水分及灰分后剩 $x (< 1)$ kg 可燃质煤。它们各自具有的可燃质应相等, 即

$$x = \frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100} \quad (1-62)$$

故由收到基成分换算到干燥无灰基成分的换算系数为 x 的倒数, 即 $\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$ 。

4. 由空气干燥基成分换算到干燥基成分, 换算系数为 $\frac{100}{100 - M_{ad}}$ 。

设 1kg 空气干燥基煤样在 (102—105) 烘箱中失去水分后得到 $x (< 1)$ kg 干煤粉, 但它们各自具有的干质应相等, 即

$$x = \frac{100 - M_{ad}}{100} \quad (1-63)$$

故由空气干燥基成分换算到干燥基成分的换算系数为 x 的倒数, 即 $\frac{100}{100 - M_{ad}}$ 。

5. 由空气干燥基成分换算到干燥无灰基成分, 换算系数为 $\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$ 。

设 1kg 空气干燥基煤样扣除水分及灰分后剩重为 $x (< 1)$ kg 可燃质煤, 即

$$x = \frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100} \quad (1-64)$$

故由空气干燥基成分换算到干燥无灰基成分的换算系数为 x 的倒数, 即 $\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$ 。

6. 由干燥基成分换算到干燥无灰基成分, 换算系数为 $\frac{100}{100 - A_d}$ 。

设由 1kg 已失去水分的干燥煤扣除其灰分剩得 $x (< 1)$ kg 可燃质煤, 即

$$x = \frac{100 - A_d}{100} \quad (1-65)$$

故由干燥基成分换算到干燥无灰基成分的换算系数为 x 的倒数, 即 $\frac{100}{100 - A_d}$ 。

将以上几种不同基煤的成分换算系数列于表 1-1:

表 1-1 不同基煤的成分换算系数

| 给定基 所求基 | 收到基 | 空气干燥基 | 干燥基 | 干燥无灰基 |
|------------|---|---|--------------------------------|---|
| 收到基 | 1 | $\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} < 1$ | $\frac{100 - M_{ar}}{100} < 1$ | $\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100} < 1$ |
| 空气干燥基 | $\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} > 1$ | 1 | $\frac{100 - M_{ad}}{100} < 1$ | $\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100} < 1$ |
| 干燥基 | $\frac{100}{100 - M_{ar}} > 1$ | $\frac{100}{100 - M_{ad}} > 1$ | 1 | $\frac{100 - A_d}{100} < 1$ |
| 干燥无灰基 | $\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}} > 1$ | $\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}} > 1$ | $\frac{100}{100 - A_d} > 1$ | 1 |

例题 1 已知煤的干燥无灰基成分: $C_{daf} = 84.6\%$, $H_{daf} = 4.24\%$, $O_{daf} = 8.72\%$, $N_{daf} = 1.62\%$, $S_{daf} = 0.82\%$, 并已知 $A_d = 24.86\%$, $M_{ar} = 9.26\%$, 求该煤的干燥基成分及收到基成分。

解 由干燥无灰基换算到干燥基成分的换算系数为: $\frac{100 - A_d}{100} = \frac{100 - 24.86}{100} = 0.7514$

则

$$\begin{aligned} C_d &= C_{daf} \times 0.7514 = 84.6 \times 0.7514 = 63.57 (\%) \\ H_d &= H_{daf} \times 0.7514 = 4.24 \times 0.7514 = 3.19 (\%) \\ O_d &= O_{daf} \times 0.7514 = 8.72 \times 0.7514 = 6.55 (\%) \\ N_d &= N_{daf} \times 0.7514 = 1.62 \times 0.7514 = 1.21 (\%) \\ S_d &= S_{daf} \times 0.7514 = 0.82 \times 0.7514 = 0.62 (\%) \\ A_d &= \underline{24.86 (\%)} \\ \text{总计} &= 100.00 (\%) \end{aligned}$$

由于干燥基换算到收到基成分的换算系数为: $\frac{100 - M_{ar}}{100} = \frac{100 - 9.26}{100} = 0.9074$

故

$$\begin{aligned} C_{ar} &= C_d \times 0.9074 = 63.57 \times 0.9074 = 57.68 (\%) \\ H_{ar} &= H_d \times 0.9074 = 3.19 \times 0.9074 = 2.90 (\%) \\ O_{ar} &= O_d \times 0.9074 = 6.55 \times 0.9074 = 5.94 (\%) \\ N_{ar} &= N_d \times 0.9074 = 1.21 \times 0.9074 = 1.10 (\%) \\ S_{ar} &= S_d \times 0.9074 = 0.62 \times 0.9074 = 0.56 (\%) \\ A_{ar} &= A_d \times 0.9074 = 24.86 \times 0.9074 = 22.56 (\%) \\ M_{ar} &= \underline{9.26 (\%)} \\ \text{总计} &= 100 (\%) \end{aligned}$$

例题 2 已知煤的空气干燥基成分 $C_{ad} = 70\%$, $H_{ad} = 3.42\%$, $O_{ad} = 1.52\%$, $N_{ad} = 1.03\%$, $S_{ad} = 2.71\%$, $M_{ad} = 2.74\%$, $A_{ad} = 18.58\%$, 以及 $M_{ar} = 3.70\%$, 求收到基成分。

解 由空气干燥基成分换算到收到基成分的换算系数为:

$$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} = \frac{100 - 3.70}{100 - 2.74} = 0.99$$

则

$$\begin{aligned} C_{ar} &= C_{ad} \times 0.99 = 70 \times 0.99 = 69.30 (\%) \\ H_{ar} &= H_{ad} \times 0.99 = 3.42 \times 0.99 = 3.39 (\%) \\ O_{ar} &= O_{ad} \times 0.99 = 1.52 \times 0.99 = 1.51 (\%) \\ N_{ar} &= N_{ad} \times 0.99 = 1.03 \times 0.99 = 1.02 (\%) \\ S_{ar} &= S_{ad} \times 0.99 = 2.71 \times 0.99 = 2.68 (\%) \\ A_{ar} &= A_{ad} \times 0.99 = 18.58 \times 0.99 = 18.40 (\%) \\ M_{ar} &= \underline{3.70 (\%)} \\ \text{总计} &= 100.00 (\%) \end{aligned}$$

第四节 煤的工业分析

一、概述

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, 燃料层不能燃烬, 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, 称为煤的工业分析。工业分析资料对决定燃煤装置的结构、操作运行条件影响很大。

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。煤的工业分析可在煤的使用单位进行, 分析试验设备比元素分析简单。测定内容和方法如下:

根据煤的工业分析内容不同(如收到基水分, 空气干燥基水分等), 试样的基亦不同, 但每一种基的质量成分之和仍为 100% , 即

$$M_{ar} + V_{ar} + FC_{ar} + A_{ar} = 100 \quad (\%) \quad (1-66)$$

$$M_{ad} + V_{ad} + FC_{ad} + A_{ad} = 100 \quad (\%) \quad (1-67)$$

$$V_d + FC_d + A_d = 100 \quad (\%) \quad (1-68)$$

$$V_{daf} + FC_{daf} = 100 \quad (\%) \quad (1-69)$$

通常, 煤的水分用收到基水分表示, 它表示入炉煤的干湿程度; 煤的灰分用干燥基灰分表示, 它表征煤的稳定质量; 煤的挥发分用干燥无灰基挥发分表示, 便于不同煤种的比较。各种基成分换算系数仍按表 1-1 中选取。

煤的工业分析与元素分析成分的关系:

| | | | | | | | | |
|------|---|---|---|---|---|---|----|---|
| | | | | | | | 焦渣 | |
| 工业分析 | M | V | | | | | FC | A |
| 元素分析 | M | H | O | N | S | C | | A |
| | <div style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 100%;"></div> | | | | | | | |
| | 100% | | | | | | | |

二、煤的水分及其工业测定

煤中的水以其不同形态分游离水、化合结晶水。前者附着于煤颗粒表面及吸附于煤毛细孔内; 后者和煤中矿物质成分化合。游离水又分外部水及内部水。附着于煤颗粒表面的