

工业锅炉丛书

锅炉燃烧技术及设备

庞丽君 孙恩昭 编



.1

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书是工业锅炉丛书第一册。锅炉工作的好坏，首先取决于燃料能否充分燃烧。我国的燃料主要是煤，而煤种复杂，不同煤种要有相适应的燃烧设备。本书主要讨论燃料的燃烧计算、燃烧过程的基本原理和各种燃烧设备。

本丛书可作为大专院校（包括业余大学和电视大学）热能工程专业和锅炉专业的参考教材；工业企业热工技术人员自学参考书；还可作为工业锅炉及辅机设计与制造部门的工程技术人员的参考资料。

工 业 锅 炉 丛 书 锅炉燃烧技术及设备

庞丽君 孙恩召 编

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
黑龙江省幼师印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张14.75 字数339000

1987年12月第1版 1987年12月第1次印刷

印数 1—5000

书号15341·60 定价2.45元

ISBN 7-5603-0024-3/TK·2



前 言

锅炉是重要的能源转换设备。据不完全统计,我国现有工业锅炉三十万台左右,经两部定点生产工业蒸汽锅炉的厂家共202家,经各省定点生产热水锅炉的厂家约500家。这些厂家急需补充锅炉专业毕业的大专、中专毕业生。与此相应,一些院校和省市教委相继开办了工业锅炉(或热能工程)大专班、业余大学和电视大学锅炉班。因此,编写一套适用于工业锅炉专业的大专教材,已成为当务之急。另外,在编写时也考虑了提高现有工业锅炉技术和管理干部专业知识水平的需要。

这套丛书的内容以锅炉基本理论和应用技术为主,同时介绍了国内外工业锅炉的发展远景,并提供工业锅炉设计和运行所需要的数据。

全部丛书分以下诸册陆续出版:

锅炉燃烧技术及设备;

锅炉结构与设计;

锅炉制造工艺与检验;

锅炉水动力学及锅内设备;

锅炉辅助设备;

锅炉热工测试技术;

锅炉自动调节。

本丛书可作为工业锅炉(或热能工程)大专、中专,业余大学和电视大学锅炉班的教材,也可供工业企业从事热工、锅炉和热能工程专业的工程技术人员参考。

本丛书由哈尔滨工业大学热能工程(原锅炉)教研室编写。由陈崇枢、秦裕琨、杨励丹、范柏樟和李之光同志组成编委会,负责丛书的审校工作。

《锅炉燃烧技术及设备》是这套丛书的第一册。锅炉工作的好坏,首先取决于燃料能否充分燃烧,我国锅炉的燃料主要是煤。按不同煤种的要求,必须有不同的燃烧设备。本书内容包括燃料的燃烧计算、燃烧过程的基本原理和各种燃烧设备。第一、二、五、六、七章由庞丽君编写,第三、四章由孙恩召编写,全书由秦裕琨审定。

工业锅炉丛书编委会

目 录

第一章 燃料

- § 1—1 燃料的资源.....(1)
- § 1—2 燃料的成分和性质.....(2)
- § 1—3 燃料成分的表示和换算.....(5)
- § 1—4 燃料的发热量.....(7)
- § 1—5 挥发分和焦.....(11)
- § 1—6 我国煤的分类.....(13)
- § 1—7 液体和气体燃料.....(18)

第二章 物质平衡与热平衡

- § 2—1 空气量计算.....(21)
- § 2—2 完全燃烧时烟气量计算.....(23)
- § 2—3 不完全燃烧时烟气量计算.....(27)
- § 2—4 过量空气系数.....(30)
- § 2—5 锅炉的空气平衡.....(35)
- § 2—6 锅炉运行时的风量调整.....(39)
- § 2—7 空气和烟气的焓.....(40)
- § 2—8 气体燃料的燃烧计算.....(44)
- § 2—9 锅炉的热平衡.....(45)
- § 2—10 锅炉效率及燃料消耗量.....(53)

第三章 燃烧理论知识

- § 3—1 燃烧速度.....(55)
- § 3—2 着火.....(58)
- § 3—3 混合.....(63)
- § 3—4 煤的燃烧.....(69)
- § 3—5 强化燃烧的途径.....(75)

第四章 火床炉

- § 4—1 概述.....(77)
- § 4—2 手烧炉.....(80)
- § 4—3 简易煤气炉.....(88)
- § 4—4 链条炉.....(98)
- § 4—5 抛煤机炉.....(117)
- § 4—6 往复推饲炉排炉.....(128)
- § 4—7 水平运动炉排.....(138)

§ 4—8 下饲式炉.....	(150)
第五章 煤粉炉	
§ 5—1 煤粉的一般性质.....	(155)
§ 5—2 煤粉制备.....	(158)
§ 5—3 煤粉气流的燃烧.....	(164)
§ 5—4 煤粉炉炉膛.....	(166)
§ 5—5 旋流式煤粉燃烧器.....	(168)
§ 5—6 直流式煤粉燃烧器.....	(173)
第六章 沸腾炉	
§ 6—1 沸腾炉的工作原理.....	(180)
§ 6—2 沸腾床的特征物理量.....	(182)
§ 6—3 沸腾炉内的燃烧与传热.....	(186)
§ 6—4 沸腾炉炉膛结构.....	(188)
§ 6—5 布风装置.....	(192)
§ 6—6 沸腾炉的运行调节.....	(195)
§ 6—7 沸腾炉存在的问题.....	(197)
§ 6—8 典型沸腾炉实例.....	(199)
第七章 燃油炉与燃气炉	
§ 7—1 油的燃烧.....	(203)
§ 7—2 油喷嘴.....	(205)
§ 7—3 调风器.....	(216)
§ 7—4 燃油锅炉的炉膛.....	(221)
§ 7—5 燃气炉.....	(224)

附表 常用的国际单位制与工程单位制对照表

主要参考文献

第一章 燃 料

§1—1 燃料的资源

燃料是指通过燃烧可以将化学能转化为热能的物质，而且获取的热能在技术上是可被利用的，在经济上也是合理的。

目前，燃料是人类利用的主要能源，它约占总能源的97%。现在世界上利用的主要能源是有机燃料，即煤炭、石油、天然气等。近年来核燃料在新能源中占首要地位。

由于生产的发展，人类生活水平的提高，燃料消耗量与日俱增，表 1—1 中列出世界燃料总储量及主要能源国1980年的产量。

表 1—1 世界燃料总储量及主要能源国的产量 (1980年)

燃 料	总储量×10 ⁹ t	1980年产量 (煤炭、石油单位为×10 ⁹ t, 天然气为×10 ⁹ Nm ³)							
		世 界	苏 联	美 国	西 德	英 国	沙 特 阿 拉 伯	科 威 特	中 国
煤 炭	19638	37.5	7.2	7.6	2.2	1.3			6.2
石 油	879	29.8	6.03	4.33		0.8	4.96	0.86	1.06
天 然 气	731752	16220	4350	5469	188	370			

我国的能源资源是比较丰富的，国外估计我国煤的地质储量为1.44万亿吨，居于世界第三位，仅次于苏联和美国。到1982年底，我国煤的探明储量已超过7000亿吨。石油与天然气的储量尚未查明。

解放以来，我国燃料工业发展较快，基本适应国民经济发展需要。1983年煤炭产量为解放前最高产量的17倍，石油达330倍。

我国煤的储量主要集中于华北地区，占60%以上，其中山西一省的储量占全国总储量的三分之一，其次是内蒙古自治区。而人口、工业比较集中的华东、中南两大地区，煤的储量合在一起只占10%左右。

石油的储量集中于东北地区，超过全国储量50%。天然气的储量以四川、贵州两省为最多，合计占全国储量的三分之二。

从能源总储量来看，我国堪称能源大国。但是，由于我国的人口居世界首位，按可采储量来计算，人均能源资源占有量只相当于世界平均值的一半，相当于美国的十分之一，苏联的七分之一。因此，必须厉行节约，合理利用能源。我国制定的能源方针是：开发和节约并重，近期要把节约放在优先地位，大力开展的节能为中心的技术改造和结构改革。

各种燃料，包括固体、液体和气体燃料均属有机燃料。锅炉燃料主要是煤、油、页

岩、石油制品和天然气等。

在我国，煤是锅炉的主要燃料，燃烧重油和天然气的电站锅炉，只占很小的比例。我国的燃料政策是电站锅炉尽量使用劣质燃料。

§1—2 燃料的成分和性质

气体燃料的成分可以用简单的分析方法求得，液体和固体燃料是复杂的高分子碳氢化合物，它们的分子结构至今还不是很清楚。但是为了工程计算，可以用元素组成来表示燃料的成分。燃料的主要元素成分是：碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）、灰分（A）和水分（W）。除灰分和水分之外，其他元素多以化合物状态存在。

1 碳（C）：是燃料中的主要可燃元素。它在燃料中不是以自由碳存在，而是和氧、氢、硫等形成复杂的化合物。燃料的碳化程度越深，含碳量也越高。随着碳化程度的加深，固定碳含量逐渐增多，而其他元素（氢、氧、氮）含量则逐渐减少。

纯碳很难着火燃烧。1kg 纯碳完全燃烧时，可放出大约33494kJ 的热量。含碳量愈高的煤，发热量愈高，而着火及燃烧均较困难。

2 氢（H）：氢也是燃料中的可燃质。1kg 氢完全燃烧时，能放出119742kJ 的热量，是碳的 3.5 倍。

氢在燃料中主要以碳氢化合物形式存在。当燃料被加热时，碳氢化合物以气态挥发出来，所以燃料中含氢越高，越容易着火燃烧。

一般煤中含氢量只有2—4%，重油含氢达10.5—12.5%。燃料碳化程度加深，氢的含量逐渐减少。含有大量氢的燃料在贮藏时易于风化，因而失去部分可燃烧元素。

3 氧（O）和氮（N）：它们都是不可燃成分。由于氧与燃料中一部分氢和碳组成化合物，使燃料中的可燃物质相对减少，燃料发热量有所降低。燃料中的氧含量变化很大，液体燃料仅含 1 % 左右，固体燃料的含氧量则随碳化程度的加深而减少，如无烟煤的含氧量仅 1—2%，而泥煤却高达 40%。燃料中的含氮量很少，约为0.5—2.5%。

4 硫（S）：它在燃料中常以三种形式存在。

(1) 有机硫，它和燃料中碳、氢、氧等结合成复杂的化合物，均匀分布在燃料中。

(2) 黄铁矿硫，以金属硫化物存在，其中主要是FeS。

(3) 硫酸盐硫，如CaSO₄、Na₂SO₄等。

有机硫和黄铁矿硫都能燃烧放出热量，称可燃硫或挥发硫，可写成Sr。硫酸盐硫不参加燃烧，是灰分的一部分。我国煤的硫酸盐硫很少，可忽略不计。

硫的发热量很低，每公斤硫燃烧后仅产生 9043kJ 的热量。硫燃烧后生成 SO₂ 和 SO₃，它们溶于水形成亚硫酸（H₂SO₃）和硫酸（H₂SO₄），会造成低温受热面金属腐蚀及堵灰。排烟中的硫化物还要污染大气，对人体和农作物都有害。含硫多的煤很硬。我国动力用煤的含硫量大部分小于 1—1.5%，只有个别的煤种高达 8—10%。对于硫分高的燃料（S>2%）在设计锅炉时应予以足够的重视。

5 灰分（A）：是燃料中不可燃的杂质。无论是固体还是液体燃料都或多或少地

含有不能燃烧的矿物杂质，它可分为内部杂质和外部杂质。外部杂质是在开采和运输过程中混入的矿石、砂和泥土等。固体燃料中的矿物杂质主要是瓷土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和氧化硅 (SiO_2) 以及其他金属氧化物等，油页岩中含有大量碳酸盐。石油中的杂质主要是铁的各种盐类和氧化物。

燃料燃烧时，这些矿物杂质进行一系列化学反应，当温度达 800°C 时这些反应基本结束。因此测定燃料中的灰分时，规定将燃料试样放在 $815^\circ\text{C} (\pm 10^\circ\text{C})$ 的电炉内灼烧，测定剩余灰分重量占试样的百分数，即可得燃料的灰分。

由上述可知，灰分不含于燃料之中，而是当燃料燃烧时由矿物杂质形成的。对于各种燃料，其灰分含量相差很大，如气体燃料基本上不含灰分，固体燃料的灰分则可能很多。

灰分的存在，不仅使燃料的发热量减少，而且影响燃料的着火与燃烧。固体状态的灰粒沉积在受热面上造成积灰；熔融状态的灰粒粘附于受热面上造成结渣，这些将影响受热面的传热。此外，烟气中的灰粒还会使受热面磨损及堵灰。烧灰分多的燃料时，从烟囱中排出大量的飞灰污染大气。因而，灰分是影响燃煤质量的主要成分，对于燃烧多灰燃料的锅炉，在设计和运行上都必须采取专门措施。

灰熔点是燃料的一个重要特性。灰分在高温下熔化。如果对炉内熔化的灰分不及时冷却，它将粘附在受热面上并形成结渣现象。严重时，可破坏锅炉正常运行。

灰的熔融性与成分及含量有关。灰的成分主要有 SiO_2 、 Al_2O_3 ，各种氧化铁 (FeO ， Fe_2O_3 ， Fe_3O_4)、 CaO 、 MgO 及 K_2O 、 Na_2O 等。对于大多数煤种的灰，其 SiO_2 (弱酸性) 的含量最多，因而呈酸性。这些成分的熔化温度各不相同，其范围从 800°C 起至 2800°C ，见表 1—2。

表 1—2 各种成分的熔化温度 $^\circ\text{C}$

成 分	熔化温度	成 分	熔化温度	成 分	熔化温度	成 分	熔化温度
SiO_2	2230	CaO	2570	Fe_2O_3	1550	Na_2O	800~1000
Al_2O_3	2059	MgO	2800	FeO	1420	K_2O	

当灰分熔化后，各种组成成分将结合成共晶体，它的熔点比结合前的成分中的最低熔点还低，从而降低了整个灰的熔化温度。灰渣中主要共晶体属 SiO_2 — Al_2O_3 — CaO — FeO 系统。同理，灰中的碱性物质 CaO 、 MgO 、 FeO 及 K_2O 、 Na_2O 等增多，也会使酸性灰的总熔化温度降低。如共晶体 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的熔化温度只有 1540°C ，比 CaO 和 SiO_2 的熔化温度均要低得多。

灰熔点还和介质性质有关，在还原性介质中 Fe_2O_3 可还原成 FeO 。灰熔点在还原性介质中要比在氧化介质中低 200 — 300°C 。煤在锅炉燃烧时，在形成灰渣的区域中常存在弱还原气氛，即指有还原性气体 (CO ， H_2 ， CH_4) 存在。因此，在测定灰熔点时，规定电炉中的介质为弱还原性气氛。

多成分的灰没有明确的熔化温度。它的熔融特性常用 t_1 、 t_2 、 t_3 三个特征温度来表

示。其中 t_1 为灰的变形温度, t_2 为灰的软化温度, t_3 为灰的熔化温度。

灰的熔融性采用角锥法测定, 如图 1—1 把灰的粉末制成小角锥 (角锥的底是正三角形, 边长 7mm, 角锥高度为 20mm, 灰锥的垂直底面的侧面与灰托板表面相垂直), 然后将它放在灰锥托板上送入硅碳管高温炉中加热, 900℃ 以前以 15—20℃/min 速度升温, 900℃ 以后温升速度为 $5 \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$, 炉内保持弱还原性气氛。随着炉温的升高, 灰

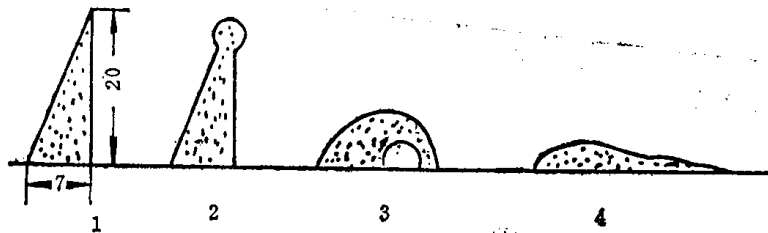


图 1—1 角锥法测定灰熔点的灰锥状态
1—灰锥的原始形状 2—变形 3—软化 4—熔化

锥形状将发生变化, 从而确定三个特征温度。当角锥尖端开始变圆或变弯时为 t_1 ; 当灰锥尖端弯曲到灰托板上或整个灰锥变成半球形的温度为 t_2 ; 当灰锥完全熔融成液态并在灰托板上流动, 或灰锥显著缩小到消失时的温度为 t_3 。

在设计锅炉时, 常根据灰的熔融性来选择炉膛出口温度 ϑ_1' , 至少应比 t_1 低 50—100℃。

此外, t_1 、 t_2 、 t_3 的间隔对结渣及流渣也有一定影响。当 $t_3 - t_1 \approx 100 - 200^\circ\text{C}$ 时, 称为短渣; $t_3 - t_1 \approx 200 \sim 400^\circ\text{C}$ 时, 称为长渣。短渣凝固快, 渣凝固后内应力大, 渣块易碎裂脱落, 故不易结渣。在固态排渣炉中短渣较为有利。相反, 长渣不易凝固, 长时间保持粘结性, 易于结渣。在液态排渣炉中长渣较为有利。

6 水分 (W): 是燃料中的杂质。它主要决定于燃料的化学性质和碳化程度, 也和埋藏、开采、运输和储存的条件有关。

燃料中的矿物杂质含有一部分结晶水 (如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 是化学结合水, 在温度达 700—800℃ 才能全部析出来, 但因含量很少, 可略去不计。

应用水分也就是燃料的全水分, 它由两部分组成, 一部分称为内在水分, 即在大气状态下风干的煤所保持的吸附水分, 随着煤形成的化学年代的增加而减少; 另一部分称为外在水分, 即煤的表面及颗粒之间所保持的水分, 随外界的环境而有较大的变动。

所谓吸附水分是当燃料表面的水蒸汽分压力和空气中水蒸汽分压力达到平衡时燃料所具有的水分, 它决定于燃料的性质和周围空气的温度和湿度。在实验室条件下, 燃料风干后所具有的吸附水分, 称为分析水分, 它是在略高于 100℃ 的温度下测定的。外在水分称为表面水分, 它是指燃料超过分析水分的水分。

水分的存在会使燃料中可燃质减少, 发热量降低; 燃料燃烧时, 首先要吸收热量蒸发水分, 所以水分大的煤不易着火燃烧; 同时水分大, 排烟带走的热量损失也大; 低温受热面容易腐蚀; 水分多的燃料不易破碎, 容易粘附在设备上, 增加粉碎时电耗。

通常固体燃料的水分用干燥法测定。将燃料在一定温度下缓慢干燥一小时后，再计算燃料失去的重量，从而得到燃料的水分。

表面水分的测定。称取一定重量 13mm 的以下粒度的煤样，置于干燥箱内，在 45~50℃ 温度下干燥 8 小时，取出后冷却称重，干燥后所失去的重量占煤样原重量的百分比即煤的表面水分。

分析水分的测定，是将风干的煤样磨碎后，称取 1 克左右的分析煤样，置于干燥箱内，烟煤、无烟煤在 105~110℃ 干燥 1~1.5 小时；褐煤在 145±5℃ 干燥 1 小时，其失去重量占煤样原重量的百分比就是分析水分。当然，这样测得的燃料的结晶水不包括在内，此外，附着水分也没完全析出。但是，如果干燥温度过高，燃料中的挥发分将要析出，影响实验结果的准确性。

§ 1—3 燃料成分的表示和换算

一 燃料成分的表示

为了实际需要和理论研究方便起见，固体和液体燃料用质量百分比表示其成分，通常采用四种“基”表示燃料成分的组成。

1 应用基：以包括全部水分和灰分的燃料作为 100% 的成分。亦即锅炉燃料的实际应用成分。应用基成分的表示符号为 C^y 、 H^y 、 O^y ……。

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y = 100\% \quad (1-1)$$

2 分析基：以去掉外在水分的燃料作为 100% 的成分，亦即试验室内进行燃料分析时的分析试样成分。分析基成分的表示符号用 C^f 、 H^f 、 O^f ……。

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S^f + A^f + W^f = 100\% \quad (1-2)$$

3 干燥基：以去掉全部水分的燃料作为 100% 的成分。燃料在开采、贮运过程中，水分会变化，这将引起应用基其他成分的变化，为了准确比较燃料中的灰分，采用干燥基成分，它不受水分变化的影响。它的表示符号为 C^s 、 H^s 、 O^s ……。

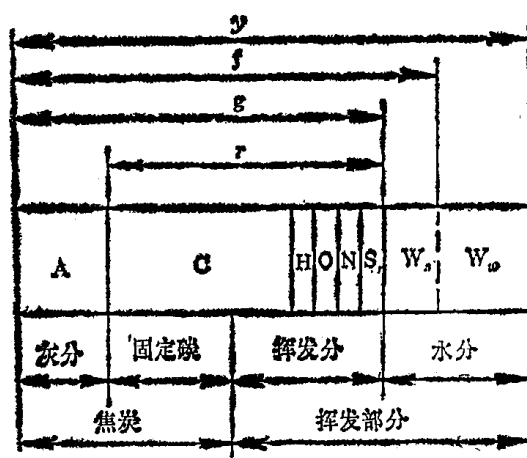


图 1—2 固体燃料成分及其组成的相互关系

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g = 100\% \quad (1-3)$$

4 可燃基：以去掉水分和灰分的燃料作为100%的成分。同一种燃料的灰分随开采、贮运、加工情况而变，燃料的可燃基成分能更准确地反映出燃料的实质，便于区别燃料的种类。它的表示符号为C'、H'、O'……

$$C' + H' + O' + N' + S' = 100\% \quad (1-4)$$

固体燃料成分及其组成的相互关系见图 1—2。

二 燃料成分表示方法的换算

上述各种“基”之间存在着一定的关系，可以互相转换。例如已知可燃基成分，求应用基成分时，可先将式（1—1）写成

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y = (100 - A^y - W^y)\%$$

再将上式与式（1—4）比较，由于燃料本质未变，可得到如下关系：

$$\frac{C^y}{C'} = \frac{100 - A^y - W^y}{100},$$

$$\frac{H^y}{H'} = \frac{100 - A^y - W^y}{100}, \dots\dots$$

所以
$$C^y = C' \times \frac{100 - A^y - W^y}{100},$$

$$H^y = H' \times \frac{100 - A^y - W^y}{100}, \dots\dots$$

式中： $\frac{100 - A^y - W^y}{100}$ 即为由可燃基转换成应用基的换算系数。

不同基间的换算关系见表 1—3。

表 1—3 换 算 系 数

已知的“基”	欲 求 的 “基”			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	1	$\frac{100 - W^f}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - A^y - W^y}$
分 析 基	$\frac{100 - W^y}{100 - W^f}$	1	$\frac{100}{100 - W^f}$	$\frac{100}{100 - A^f - W^f}$
干 燥 基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^g}$
可 燃 基	$\frac{100 - A^y - W^y}{100}$	$\frac{100 - A^f - W^f}{100}$	$\frac{100 - A^g}{100}$	1

比较应用基和分析基，则它们之间的关系可用下式表示：

$$W^y = W_w + W^f \cdot \frac{100 - W_w}{100} \quad (1-5)$$

式中： W_w ——外在水分，空气风干过程中逸走的水分，即表面水分。

在换算中常用的是同一种煤，由于水分变动而引起应用基成分变化。例如某种煤应用基水分分为 W_1^y ，水分变化后其应用基水分分为 W_2^y ，由于同一种煤的水分变化不影响干燥基成分，因此可以写出：

$$C^g = C_1^y \cdot \frac{100}{100 - W_1} = C_2^y \cdot \frac{100}{100 - W_2}$$

得到

$$C_2^y = C_1^y \cdot \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} \quad (1-6)$$

气体燃料的成分一般用容积百分比表示，通常以干燥的气体燃料作计算成分的标准，水分则以每 Nm^3 〔注〕干燥气体携带的水蒸汽克数 (g/Nm^3) 来表示。

§1—4 燃料的发热量

燃料的发热量有高位发热量 Q_{gw} 和低位发热量 Q_{dw} 两种。单位用 kJ/kg (kJ/Nm^3) 表示。

高位发热量 Q_{gw} — 1kg (1Nm^3) 燃料完全燃烧后放出的全部热量，包括烟气中水蒸汽凝结时放出的热量。

低位发热量 Q_{dw} — 1kg (1Nm^3) 燃料完全燃烧后放出的全部热量，再扣除水蒸汽的汽化潜热后所得的热量。

燃料在锅炉燃烧后，排出烟气一般还具有相当高的温度，烟气中的水蒸汽不可能凝结下来，这样就带走了一部分汽化潜热，因而锅炉技术中通常采用低位发热量作为计算依据。

煤燃烧所生成的水蒸汽来自煤中的水分和氢的燃烧。由化学反应式



可知，每燃烧 1kg 氢可生成 9kg 水蒸汽，所以高、低位发热量之间的关系按应用基计算为

$$\begin{aligned} Q^y &= O_{gw}^y - 2512 \left(9 \frac{H^y}{100} + \frac{W^y}{100} \right) \\ &= Q_{gw}^y - (226H^y + 25W^y) \text{kJ}/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中：2512——水在 0°C 时的汽化潜热的近似值， kJ/kg ；

$\frac{W^y}{100}$ 、 $\frac{H^y}{100}$ ——煤中应用基水分及氢的质量， kg 。

同理，对于煤的分析基则有：

$$Q_{dw}^f = Q_{gw}^f - (226H^f + 25W^f) \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-8)$$

对于干燥基和可燃基，由于没有水分，所以为

注：N表示在标准状态下，下同。

$$Q_{dw}^g = Q_{gw}^g - 226H^g \quad \text{kJ/kg} \quad (1-9)$$

$$Q_{dw}^r = Q_{gw}^r - 226H^r \quad \text{kJ/kg} \quad (1-10)$$

各种“基”的高位发热量之间可以用直接乘上换算系数（表 1—3）进行换算。对于低位发热量则不然，因为水分不仅使可燃元素含量减少，且使汽化潜热损失增加。因此，对于低位发热量之间的换算，必须先化成高位发热量之后才能进行。

例如将煤的可燃基低位发热量换算成应用基低位发热量，首先将可燃基低位发热量 Q_{dw}^r 换算成高位发热量：

$$Q_{gw}^r = Q_{dw}^r + 226H^r$$

又

$$Q_{gw}^y = Q_{dw}^y + 226H^y + 25W^y$$

然后

$$Q_{gw}^y = Q_{gw}^r \frac{100 - (A^y + W^y)}{100}$$

$$= (Q_{dw}^r + 226H^r) \frac{100 - A^y - W^y}{100}$$

代入后即得：

$$Q_{dw}^y = Q_{dw}^r \frac{100 - A^y - W^y}{100} - 25W^y \quad \text{kJ/kg} \quad (1-11)$$

同理可得：

$$Q_{dw}^y = Q_{dw}^g \frac{100 - W^y}{100} - 25W^y \quad \text{kJ/kg} \quad (1-12)$$

$$Q_{dw}^y = (Q_{dw}^f + 25W^f) \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25W^y \quad \text{kJ/kg} \quad (1-13)$$

表 1—4 是各种“基”低位发热量之间的换算公式。

表 1—4 各种“基”低位发热量的换算公式

已知的“基”	欲 求 的 “基”			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	—	$Q_{dw}^f = (Q_{dw}^y + 25W^y) \times \frac{100 - W^f}{100 - W^y} - 25W^f$	$Q_{dw}^g = (Q_{dw}^y + 25W^y) \times \frac{100}{100 - W^y}$	$Q_{dw}^r = (Q_{dw}^y + 25W^y) \times \frac{100}{100 - W^y - A^y}$
分 析 基	$Q_{dw}^y = (Q_{dw}^f + 25W^f) \times \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25W^f$	—	$Q_{dw}^g = (Q_{dw}^f + 25W^f) \times \frac{100}{100 - W^f}$	$Q_{dw}^r = (Q_{dw}^f + 25W^f) \times \frac{100}{100 - W^f - A^f}$
干 燥 基	$Q_{dw}^y = Q_{dw}^g \frac{100 - W^g}{100} - 25W^y$	$Q_{dw}^f = Q_{dw}^g \frac{100 - W^f}{100} - 25W^f$	—	$Q_{dw}^r = Q_{dw}^g \times \frac{100}{100 - A^g}$
可 燃 基	$Q_{dw}^y = Q^r \times \frac{100 - W^y - A^y}{100} - 25W^y$	$Q_{dw}^f = Q_{dw}^r \times \frac{100 - W^f - A^f}{100} - 25W^f$	$Q_{dw}^g = Q_{dw}^r \times \frac{100 - A^g}{100}$	—

如果燃料中的应用基水分从 W_1^y 变化为 W_2^y 时, 则变化后燃料应用基低位发热量可按下式计算:

$$Q_{dw2}^y = (Q_{dw1}^y + 25W_1^y) \frac{100 - W_2^y}{100 - W_1^y} - 25W_2^y \quad \text{kJ/kg} \quad (1-14)$$

如果燃料中的水分、灰分都发生变化时, 可以求出变化后燃料应用基低位发热量:

$$Q_{dw2}^y = (Q_{dw1}^y + 25W_1^y) \frac{100 - W_2^y - A_2^y}{100 - W_1^y - A_1^y} - 25W_2^y \quad \text{kJ/kg} \quad (1-15)$$

式中: Q_{dw1}^y 、 Q_{dw2}^y ——变化前、后燃料应用基低位发热量, kJ/kg;

W_1^y 、 W_2^y ——变化前、后燃料应用基水分%;

A_1^y 、 A_2^y ——变化前、后燃料应用基灰分, %。

煤的发热量可用热量计直接测定, 如图 1—3。

基本原理是: 使煤样在充满压力氧的氧弹中燃烧, 放出的热量被氧弹外的水吸收, 测定水温的升高, 便可计算出煤的发热量。

使用氧弹热量计测得煤的发热量为分析煤样弹筒发热量 Q_{dt}^f , 它比高位发热量大些, 因为硫和氮在氧弹的压缩氧气中生成了硫酸和硝酸, 硫酸和硝酸又溶解于水, 它们放出了生成热和溶解热。

分析煤样的高位发热量按下式计算:

$$Q_{gw}^f = Q_{dt}^f - (94.2S_{dt}^f + aQ_{dt}^f) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-16)$$

式中: S_{dt}^f ——由弹筒洗液中测得的煤的含硫量, %;

a ——由氮生成硝酸并溶于水所放出热量的系数。

对贫煤、无烟煤, $a = 0.0042$; 对其它煤种, $a = 0.0063$ 。

燃料的发热量亦可按元素成分进行校验计算。实际上燃料各组成成分并不是以元素状态存在的, 而是形成复杂的化合物, 因此不能直接按各种可燃元素的发热量计算, 只能采用经验公式计算。

1 根据元素成分计算的门德雷也夫公

式:

$$O_{gw}^y = 339C^y + 1030H^y + 109(S^y - O^y) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-17)$$

此式可用于检验元素分析及发热量实测值的准确性。当煤的 $A^s \leq 25\%$ 时, 实际发热量与按该式计算的发热量之差不应超过 600 kJ/kg ; 当 $A^s > 25\%$ 时, 其差值不应超过 800 kJ/kg 。

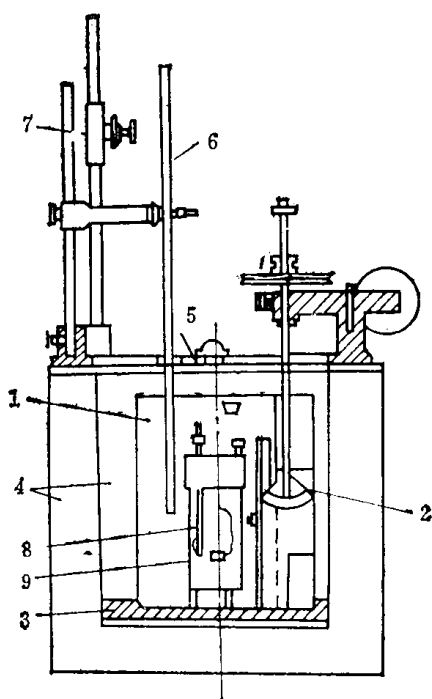


图 1—3 氧弹热量计

1—容器 2—桨式搅拌器 3—绝缘底垫
4—双壁外筒 5—顶盖 6—温度计 7—
温度照明装置 8—氧弹 9—坩锅

2 根据工业分析结果计算的经验公式，

以烟煤为例：

$$Q_{dw}' = 4.1868[100K_1 - (K_1 + 6)(W' + A')3V' - 40W'] \text{ kJ/kg} \quad (1-18)$$

其中 K_1 值见表 1—5。

表 1—5 K_1 值

Vr %	10—13.5	13.5—17	17—20	20—23	23—29	29—32	32—35	35—38	38—40
K_1	84—84.5	84—85	82—85	82—85	81—85	80—85	79—83	78—83	76—82

对于无烟煤、褐煤均有各自的经验公式。这些经验公式可供估算或校验用，不能做为正式试验与计算的依据。

3 混合燃烧两种不同煤时，1kg混煤的发热量计算公式为

$$Q_{dw}^y = Q_{dw1}^y g_1 + Q_{dw2}^y (1 - g_1) \text{ kJ/kg} \quad (1-19)$$

式中： Q_{dw1}^y 、 Q_{dw2}^y ——分别为混合前两种煤的发热量，kJ/kg；

g_1 ——发热量为 Q_{dw1}^y 的煤的质量份额。

混合煤的元素成分也可以按同样方法计算，例如

$$C^y = C_1^y g_1 + C_2^y (1 - g_1) \% \quad (1-20)$$

气体燃料的发热量可根据各项可燃气体的发热量和各项气体所占总体积百分数计算：

$$Q_{dw}^g = \sum \frac{K}{100} Q_{dw} \text{ kJ/Nm}^3 \quad (1-21)$$

式中：K——各项可燃气体的体积百分数，%；

Q_{dw} ——各项可燃气体的低位发热量，kJ/Nm³。

各项可燃气体发热量见表 1—6。

表 1—6 可 燃 气 体 发 热 量 kJ/Nm³

可燃气体	甲 烷	乙 烷	丙 烷	丁 烷	戊 烷	乙 烯	丙 烯	丁 烯	硫化氢
分 子 式	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	C ₄ H ₈	H ₂ S
Q_{dw}	35818	63748	91251	118646	146077	59063	86000	113508	23383

若气体燃料中含有不明成分的不饱和烃达 30% 左右时，可定其由乙烯 (C₂H₄) 组成。对于焦炉煤气，成分不明的不饱和烃的低位发热量为 $Q_{dw}^g = 7118 \text{ kJ/Nm}^3$ 。

对于高炉煤气，若用洗涤塔清灰，则含有 0.1—1g/Nm³ 的饱和水；若用洗涤机清灰，则含有 0.01—0.3g/Nm³ 饱和水。

不同种燃料的发热量不同，为了便于比较不同燃烧设备中燃料的消耗量和制定国家标准，采用标准燃料概念，即应用基低位发热量是 29308kJ/kg (7000kcal/kg) 的燃料为标准燃料。这样就可以把实际消耗的燃料量折合成标准燃料量，即

$$B_b = B \frac{Q_{yw}^y}{29308} \quad \text{kg/h} \quad (1-22)$$

式中：\$B_b\$——标准燃料消耗量，kg/h；

\$B\$——实际燃料消耗量，kg/h。

§1—5 挥发分和焦

煤在隔绝空气的情况下加热，煤中的有机质和矿物质发生分解并析出气态物质（主要是 \$H_2\$，\$C_mH_n\$，\$CO\$ 和 \$CO_2\$ 等），这些气态物质叫做挥发分，用 \$V\$ 表示。

挥发分不是以自然状态存在于燃料中，而是煤在高温下受热分解的产物，随加热温度和加热时间的不同，煤的分解程度也不同。

煤的挥发分是表征煤燃烧特性的重要指标。煤燃烧时，挥发分首先析出和空气混合并着火，因此它对燃烧过程的初始阶段更具有特殊的意义。挥发分愈高，愈容易着火，燃烧也愈好。随着煤的碳化程度加深，挥发分含量逐渐减少，挥发分析出温度与着火温度也逐渐提高，各种煤的挥发分开始析出温度见表 1—7。

表 1—7 各种煤挥发分开始析出温度

煤 种	挥 发 分 (\$V\$, %)	挥发分开始析出温度 \$^{\circ}C\$
无 烟 煤	\$\leq 10\$	380—400
贫 煤	10—20	370—390
烟 煤	20—40	170—320
褐 煤	40—60	130—170

挥发分除取决于燃料本身性质外，还与加热条件有关，温度愈高，析出挥发分愈多。挥发分终止析出的温度不低于 \$1100-1200^{\circ}C\$。

工业分析挥发分是将煤样放在 \$900 \pm 10^{\circ}C\$ 的坩锅中，隔绝空气加热 7 分钟后，测量试样减轻的重量求得的。

析出挥发分后剩下的残留固态物质叫做焦炭。粉末状煤隔绝空气加热后，所得焦炭可能结成块状，也可能仍呈粉末状，这种性质称为煤的焦结性，它也是煤的重要特性之一。

在火床炉中粉末状的焦易被空气吹走，使燃烧不完全。但如果焦结性很强，又会使得煤层阻力增加，甚至阻碍空气流通。一般，挥发分太多或太少的煤，焦结性都不太好。

煤的焦结性根据焦炭的外形和强度来判断，它可以分为以下八类：

- 1 粉状。全部粉状，没有互相粘着的颗粒。

- 2 粘着。用手指轻碰即成粉状，或基本上是粉状。
- 3 弱粘结。用手指轻压即碎成小块。
- 4 不熔融粘结。以手指用力压才裂成小块，焦渣表面无光泽，下表面稍有银白色光泽。
- 5 不膨胀熔融粘结。焦渣是扁平的饼，煤粒的界线不易分清，表面有明显银白色金属光泽。焦渣下表面银色光泽更明显。
- 6 微膨胀熔融粘结。用手指压不碎，在焦渣的表面上，具有较小的膨胀泡。
- 7 膨胀熔融粘结。焦渣上、下表面有银白色金属光泽，明显膨胀，但高度不超过15mm。
- 8 强膨胀熔融粘结。焦渣上、下表面有银白色金属光泽，焦渣高度大于15mm。

为了简便起见，可用上列序号作为各种焦炭特征的代号。

这种分类法带有很大主观性，只能给出一个相对的近似概念，但它使用很普遍。也可以用其他较精确的办法，例如可以用胶质层厚度测定法。本法模拟工业条件，将煤样放入杯中自下而上加热，杯内的煤样形成一系列等温层面，这些层面的温度由上而下依次递增，处于软化点以下的煤都软化成胶质体，处于固化点以下的煤则结成半焦，因此煤样中形成了半焦层、胶质层和未软化的煤样层三部分。

胶质层的厚度用针测量，先测量胶质层的上部层面，然后用针穿过胶质层，达到坚固的半焦层，测定胶质层的下部层面。在试验过程中，最初在杯内下部生成的胶质层比较薄，以后逐渐变厚，然后又逐渐变薄。因此杯的中部常出现胶质层厚度最大值。胶质层上下层面之间的最大距离（mm）称为最大胶质层厚度，用Y表示，这个数值可以用来表示煤的焦结性。胶质层愈厚，焦结性愈强。

测定挥发分后剩余的焦炭量减去灰分，又称为固定碳。

煤的发热量、挥发分、固定碳、灰分、水分和焦结性是它的重要特性，测定这些特性的实验称为工业分析。煤的工业分析成分也可用各种“基”来表示：

$$V^y + C_{gd}^y + A^y + W^y = 100\% \quad (1-23)$$

$$V^f + C_{gd}^f + A^f + W^f = 100\% \quad (1-24)$$

$$V^s + C_{gd}^s + A^s = 100\% \quad (1-25)$$

$$V^r + C_{gd}^r = 100\% \quad (1-26)$$

式中：V、C_{gd}——分别为煤的挥发分和固定碳的含量，%。

各种基之间的换算系数，仍可采用表 1—3 值。

水分和灰分增加时，燃料的发热量降低，锅炉要维持原蒸发量就必须燃用更多的燃料。这些增加的燃料量带进了更多的水分及灰分，所以分析它们对锅炉工作的影响时，使用折算水分和折算灰分更为方便。它们的定义为：

$$W_{zs}^y = \frac{W^y}{\frac{Q_{dw}^y}{4186.8}} \quad A_{zs}^y = \frac{A^y}{\frac{Q_{dw}^y}{4186.8}}$$

即每送入炉膛 4186.8kJ(1000kcal) 的热量所带入的水分和灰分。其中 Q_{dw}^y 为燃料的应用基低位发热量。