

高等学校试用教材

燃烧理论与燃烧设备

清华大学 徐旭常 毛健雄 编
曹瑞良 陈昌和

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

改定稿。各章节的作者分别是：第一、四、五章——曾瑞良；第二章和第三章的大部分——陈昌和；第六、八章和§ 7-1、§ 7-6、§ 7-7——毛健雄；第七章的§ 7-2、§ 7-3、§ 7-4、§ 7-5和第三章的§ 3-5、§ 3-7、§ 3-9——徐旭常。

哈尔滨工业大学秦裕琨教授在编写过程中和成稿后曾两次审阅本书，提出了许多宝贵意见，对书稿的完善给予了很大的帮助。

考虑到各院校授课的情况不尽相同以及有关科技人员的业务范围各异，本书内容取材尽量满足各方面的要求，也为了便于自学，作者努力使本书内容尽量完整和系统化，并尽可能地附以插图。如果读者已具有了燃料和燃烧设备概述的知识，讲授或阅读时可略去第一章和§ 4-1、§ 6-1、§ 6-10。如果已学过物理化学，可以略去第二章。其他章节也可按不同的要求分别选为重点或简略。

本书还结合燃烧理论和燃烧设备的基本内容扼要地介绍了我国各高等院校和各研究开发机构以及国外的新近研究成果，力图说明近年来燃烧理论和技术的发展方向。

作者

1988年10月

前 言

本书是根据全国高等工业院校热能工程(锅炉)专业教学指导委员会1987年全体会议上审查通过的编写大纲撰写的。

自从1964年出版了清华大学教材《燃烧学》(上册燃烧理论、下册燃烧技术基础)以来,根据我们在教学中的经验,逐次补充和修改后编成本书——《燃烧理论与燃烧设备》。本书结合锅炉用的燃烧设备,也尽可能联系热能工程中的其它燃烧装置来讲述,使读者在学习了燃烧理论后就能了解工程实际中各类主要燃烧设备的特点、性能以及有关理论的实际应用。改变以往学习燃烧理论时常不涉及实际工程燃烧设备的不足,以达到学以致用目的。

本书前两章分别介绍了燃料、燃烧产物及带有燃烧设备的热工装置的各项热损失,以及与燃烧过程有密切关系的涉及化学反应速率的化学动力学基本知识。这是学习本书的基础准备。

本书结合气体燃料的自然和点燃理论、预混可燃气体的火焰传播、火焰稳定和射流火焰来讲述最基本的燃烧理论,这些知识也是液体、固体燃料燃烧的基本知识。为使这些基本燃烧理论不至描述得过于复杂而妨碍对理论本质的理解,一般将它们作为较单纯的气体燃料的燃烧理论来阐述,实际上对于液体和固体燃料燃烧过程中的气相燃烧和火焰特性等基本理论也是相仿的。第三章即叙述气体燃料的燃烧理论和燃烧设备。

第四、五章分别介绍液体燃料的燃烧理论和燃烧器。液体燃料的燃烧理论归结起来主要是液滴的蒸发、气相的扩散和燃烧。液体燃料燃烧器的设计和使用的关键问题是雾化 and 配风。

固体燃料主要是煤,它占我国能源消耗的70%,它的燃烧理论和燃烧设备不仅在我国而且对世界今后的能源利用都是重要课题。第六章专门阐述与煤有关的燃烧理论,其中主要论述异相化学反应的焦炭燃烧问题。第七章介绍常用的煤粉燃烧设备。燃烧产物对大气的污染是涉及各种燃料燃烧的重要问题,而燃煤生成的 NO_x 、 SO_x 对污染尤为严重,因此集中在这一章中讨论。这章中还介绍了水煤浆燃烧和液态排渣炉。第八章介绍层煤的另外两种主要方式:层燃和沸腾燃烧。层燃是燃煤工业锅炉和工业窑炉最常用的燃烧方式;沸腾燃烧则是60年代迅速发展起来的新燃煤方式。

一些燃烧基本问题虽然和各种燃料的燃烧都有关系,但为了尽可能叙述得透彻些,编写时常将某个问题集中地放在某一章中详细讲述,例如湍流对燃烧的影响, NO_x — SO_x 的污染问题等。必要时,有些内容分别在各章中提到,以利于结合实际和便于教学,例如旋转气流在第三章中仅简单地叙述了基本概念,然后在第五章中结合离心式机械喷嘴的雾化原理和烧油的旋流配风器以及在第七章中结合旋流煤粉燃烧器的工程实用来具体地讨论。

本书尽可能从各主要方面阐述对不同问题的看法,援引了主要参考资料的重要论点,还由于阐述中可能有偏差或疏漏,以及为便于读者查找有关参考文献并扩大自学的参考范围,本书各章列出了本章的参考文献。

本书由清华大学的《燃烧理论与燃烧设备》授课教师合作编写。全书由徐旭常主编和修

目 录

第一章 燃料、燃烧产物及热损失	1	§ 6-5 蒸汽喷嘴	193
§ 1-1 燃料的化学成分和性质	1	§ 6-6 配风器	201
§ 1-2 煤的分类	7	参考文献	213
§ 1-3 液体燃料和气体燃料	12	第六章 固体燃料的燃烧理论	214
§ 1-4 燃料的燃烧产物 (烟气)	15	§ 6-1 概述	214
§ 1-5 空气和烟气量的计算	22	§ 6-2 煤的热分解	214
§ 1-6 燃烧设备的热平衡及热效率	23	§ 6-3 碳燃烧的异相反应理论	225
参考文献	28	§ 6-4 碳燃烧的化学反应机理	227
第二章 化学动力学基础	29	§ 6-5 碳燃烧反应的控制	232
§ 2-1 化学反应速率	29	§ 6-6 多孔性碳粒的燃烧	235
§ 2-2 浓度对化学反应速率的影响	30	§ 6-7 二次反应对碳燃烧过程的影响	241
§ 2-3 温度对化学反应速率的影响	34	§ 6-8 碳粒的燃尽时间	244
§ 2-4 压力对化学反应速率的影响	38	§ 6-9 具有空间二次反应的碳颗粒燃烧速 率	249
§ 2-5 链锁反应	40	§ 6-10 煤的燃烧及燃烧方式	252
§ 2-6 化学平衡	45	参考文献	264
参考文献	46	第七章 煤粉燃烧	266
第三章 气体燃料的燃烧	47	§ 7-1 煤粉火炬燃烧的特点	266
§ 3-1 预混可燃气体的着火和自燃理论	47	§ 7-2 煤粉燃烧设备和制粉系统	276
§ 3-2 预混可燃气体的点燃理论	56	§ 7-3 旋流煤粉燃烧器及其布置	291
§ 3-3 层流火焰传播	68	§ 7-4 直喷煤粉燃烧器及其布置	299
§ 3-4 湍流火焰传播	82	§ 7-5 煤粉火焰的稳定方法和低污染燃烧 技术	314
§ 3-5 火焰的稳定	88	§ 7-6 水煤浆及其燃烧	332
§ 3-6 气体燃料火焰的类型和自由射流的 基本特性	100	§ 7-7 液态排渣炉	336
§ 3-7 湍流流动数值计算简介和各种复杂 流动的特点	109	参考文献	341
§ 3-8 射流火焰	117	第八章 煤的层燃及沸腾燃烧	342
§ 3-9 气体燃料燃烧设备	125	§ 8-1 煤的层燃设备概述	342
参考文献	137	§ 8-2 固定炉排	345
第四章 液体燃料的燃烧理论	138	§ 8-3 链条炉	348
§ 4-1 液体燃料燃烧的特点	138	§ 8-4 抛煤机炉	356
§ 4-2 Stefan (斯蒂芬) 流	140	§ 8-5 往复炉排	360
§ 4-3 液滴的蒸发	142	§ 8-6 驱动炉排	362
§ 4-4 液滴的燃烧	150	§ 8-7 炉排上固体燃料层的理论研究 工作	364
§ 4-5 液体燃料燃烧的实验研究	157	§ 8-8 沸腾燃烧概述	368
参考文献	159	§ 8-9 沸腾炉的结构	370
第五章 液体燃料燃烧器	160	§ 8-10 沸腾床内的气固流动特性	371
§ 5-1 液体燃料燃烧对燃烧器的要求	160	§ 8-11 沸腾燃烧过程的特点	374
§ 5-2 旋转气流特性	167	§ 8-12 沸腾燃烧脱碳	381
§ 5-3 离心式机械喷嘴工作原理	173	§ 8-13 循环床	382
§ 5-4 回油喷嘴及计算	184	参考文献	387

第一章 燃料、燃烧产物及热损失

§ 1-1 燃料的化学成分和性质

工业和发电燃烧设备(锅炉)上所用的燃料有固体燃料(以煤为主)、液体燃料(以重油为主)和气体燃料(煤气)三大类。我国则以煤为最主要的锅炉用燃料。燃烧液体和气体燃料的工业锅炉和电站锅炉只占很小部分。我国的燃料政策规定,锅炉应该尽量使用劣质燃料。

一、燃料的成分及燃烧特性

固体、液体及气体各种燃料都属有机燃料,即都是复杂的高分子烃类物质。燃料主要的化学成分有:碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、灰分(A)及水分(W)。

1. 碳(C)

碳是燃料中主要的可燃元素,一般占燃料成分的15%~90%,(煤中约占50%~90%),埋藏年代越久的煤,其碳化程度越深,含碳量也越高,而氢、氧、氮等的含量则减少。例如无烟煤的埋藏年代最久,含碳量可达90%以上;而褐煤埋藏年代最短,含碳量为50%~70%。

碳完全燃烧时生成二氧化碳(CO_2),此时每千克纯碳可放出32866kJ热量;碳在不完全燃烧时生成一氧化碳(CO),此时,每千克纯碳放出的热量仅为9270kJ。

由于纯碳的着火与燃烧都较困难,因此含碳量高的煤难以着火、燃尽,但其发热量都较高(例如无烟煤),所以无烟煤属于难燃的煤种,需要设计特殊的燃烧设备,以利于它的着火与燃尽。

2. 氢(H)

氢也是燃料中的可燃成分。该元素的发热量最高,每千克氢燃烧后的低位发热量为120370kJ(约为纯碳发热量的4倍),但煤中氢的含量较少,约为2%~10%。随着碳化程度的加深,煤中的氢元素含量减少。液体燃料中的氢元素含量稍多,一般可达15%左右。气体燃料中的含氢量较多,尤其是天然气。

3. 硫(S)

硫燃料中的硫分为两部分,一部分含在硫酸盐中如硫酸钙、硫酸镁,称无机硫,它不能燃烧,是灰的一部分;另一部分是有机硫和黄铁矿硫,可燃烧放热,但每千克可燃硫的发热量仅为9100kJ。硫燃烧后在烟气中以 SO_2 及少量的 SO_3 存在。 SO_2 使烟气中的水蒸汽露点大大升高。烟气中的 SO_2 及 SO_3 能溶于水变成 H_2SO_3 (亚硫酸)及 H_2SO_4 (硫酸),它会使锅炉低温受热面(如空气预热器)金属腐蚀及堵灰。锅炉的排放烟气中,硫化物将污染环境,对人体及农作物皆有害。

我国煤中的硫酸盐硫很少,可忽略不计,因此一般可用黄铁矿硫代表元素分析所得的全硫。我国大部分动力用煤的含硫量为1%~2%,在南方有些地区的劣质烟煤的含硫量为3%~5%,有的甚至高达10%。对于含硫分超过2%的燃料,在设计锅炉时应该重视减少低温腐蚀,有些应采取脱硫措施,以减少排烟中的硫化物含量。

4. 氧(O)和氮(N)

氧和氮它们都是不可燃成分,氧已和燃料中的部分氢、碳组成 H_2O 、 CO_2 ,使燃料中的碳、氢可燃成分相对减少,氮是惰性物质,因此氧、氮元素的存在会使燃料发热量有所下降。一般氮的含量只占1%~2%。而氧的含量变化范围较大,如液体燃料仅含1%左右,固体燃料煤中的含氧量则随碳化程度的加深而减少,如无烟煤的含氧量约为1%~2%,而泥煤的含氧量可达40%。氮和氧在高温下形成氮氧化物 NO 、(NO 及 NO_2),这对生态环境极为有害。目前国内外都在研究能降低排烟中 NO_x 含量的燃烧器及燃烧设备,有的已取得了较好的效果,在设计燃烧设备时应充分重视 NO_x 的排放指标。

5. 灰分(A)

灰分是燃料中不可燃的矿物杂质,各种燃料的灰分含量相差较大,如气体燃料及液体燃料基本上不含灰分,固体燃料煤中灰含量为10%~30%,有些劣质煤的灰含量可达50%,油页岩的含灰量高达50%~60%以上。灰分的来源有两个,一是形成燃料的物质本身的矿物质和燃料形成过程中进入的外来矿物质,二是开采运输过程中掺杂进来的矿物质(如灰、沙土等)。

灰分含量高的燃料不仅使发热量减小,而且影响燃料的着火与燃烧,由于燃烧的烟气中灰分浓度大,使受热面易受污染而影响传热、降低效率,使受热面易磨损而减少寿命。对排烟中的含尘量必须采用高效除尘措施,使含尘降低至合格的排放指标,工业用锅炉尤应重视。象灰分含量高于40%~50%的劣质燃料,应该就地使用,不宜长途运输,否则经济上不合算。

燃料燃烧后余下的灰分成分与原来燃料里的灰分成分不完全相同,因为在燃烧过程中有脱水、分解等变化(约在800°C完成)。

灰分的熔点是非常重要的特性指标,简称灰熔点。该特性指标与灰中的成分及含量有关,大多数煤的灰分呈酸性,因其中含 SiO_2 很多。灰中各成分的熔化温度各不相同(见表1-1)。

表1-1 灰中各种成分的熔化温度

成分	熔化温度/°C	成分	熔化温度/°C	成分	熔化温度/°C	成分	熔化温度/°C
SiO_2	2230	CaO	2570	Fe_2O_3	1550	Na_2O	800~1000
Al_2O_3	2050	MgO	2800	FeO	1420	K_2O	800~1000

灰分的熔点与各成分含量有关。例如,当 $SiO_2 + Al_2O_3$ 含量高,且 SiO_2/Al_2O_3 比值低(约为1.18)时,灰熔点大多较高;当 SiO_2/Al_2O_3 比值升高,则灰熔点降低。

灰熔点常用三个特性温度表示,即温度 t_1 、 t_2 、 t_3 。温度 t_1 为灰的开始变形温度, t_2 为灰的软化温度, t_3 为灰的熔化温度。其测定方法采用角锥法。将灰样研碎并加粘结剂制成角锥体,将它放入可

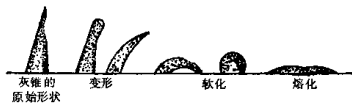


图1-1 角锥法灰熔点温度下的灰锥状态示意图

观测的高温电炉中加热,炉中维持半还原性气氛(该气氛中测定的灰熔点比氧化性气氛中低,因而使用户对结渣的危险更为警惕)。试样加热到一定温度时,角锥顶尖开始变形,该

温度即为 t_1 。再加热使角锥软化歪倒，此时的温度为 t_2 。温度继续加热，当角锥开始熔化时，此温度即为 t_3 。 t_1 、 t_2 、 t_3 温度对应的灰锥状态示于图 1-1。

一般煤的灰熔点 (t_1 、 t_2 、 t_3) 在 1000~1600°C 范围。在煤粉炉中如果飞灰处于熔化状态，就会粘在受热面（水冷壁）及炉墙上，使熔化的灰堆积冷却成渣块，常称为结渣。结渣后的受热面吸热量减少，从而使炉温升高；炉温的升高又使结渣更为严重，这样，造成恶性循环，使锅炉不能正常运行。低灰熔点的煤在层燃炉排上燃烧时，会使炉排及炉拱上结渣，严重时也不能正常运行。另外， t_1 、 t_2 、 t_3 的间隔大小对结渣及渣的流动也有影响，间隔较大（约 200°C）的称长渣，间隔较小的（约 100°C）称为短渣。长渣凝固较慢，短渣凝固较快。为了烧低灰熔点的煤，采用所谓液态排渣炉，即灰渣在熔化流动状态下排出炉外。为提高炉内温度，常将一部分水冷壁涂敷耐火塑料，以减少吸热量。升高炉温（燃烧温度最高可达 1700°C）可使灰保持液态，顺墙流出排渣口。液态排渣炉能顺利排出液态渣，除要求煤的灰熔点较低外，还需了解不同温度下的灰粘度（粘温特性）以估计能否在一定温度范围内排渣。燃用低灰熔点的长渣煤有利于液态渣的形成和排出。

6. 水分 (W)

水分是燃料中不可燃成分。其含量变化甚大，如液体燃料约含水 1%~3%，固体燃料中埋藏年代短的褐煤水分达 40%~50%（如云南昭通褐煤）。煤中水分的来源有三种，即外部水分、内部水分和化合水分。将煤样放在空气中自然干燥，很快会失去一部分水分，并达到空气干燥状态，这失去的水分称外部水分。它包括煤在矿层中吸收的地下水，还有存放、运输时遇雨雪，以及人为喷洒的水分。将空气干燥的煤放到烘箱内，在 102~105°C 下烘干，这时失掉的水分称内部水分或固有水分。煤中一部分氢、氧化合物水并与煤中的化合物结合，称化合水或结晶水，这部分水较少，用加热方法不能测出，故测出的水分是外部水分和内部水分之和。

含水分大的燃料发热量低，不易着火、燃烧，而且在燃烧过程中水分的汽化要吸收热量，并降低燃烧室温度，使锅炉效率降低，还易在低温处腐蚀设备；由于煤中水分含量大还易使制粉设备制粉困难，需要有高温空气或烟气进行干燥；水分大的燃料也不利于运输。

二、燃料的成分分析基础和换算

1. 燃料的成分分析基础

气体燃料的成分用体积百分数表示，而固体和液体燃料的成分，通常用质量百分数表示 \ominus ，即

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

式中，C、H、O、N 和 S 为可燃质中所含碳、氢、氧、氮和硫所占燃料重量的百分数；A 和 W 为灰分和水占煤重量的百分数。式 (1-1) 中的各成分可用元素分析得到。下面用煤为例说明各成分分析基础。

由于同种煤的水分和灰分含量常随开采、运输、贮存或气候条件的变化而改变，因此，其它成分的含量也随之发生变化。为了实际应用的需要和理论研究的方便，通常采用四种不同“基”作为燃料成分分析的基础。例如：在表示煤的成分时，把水分、灰分含量除外，则

\ominus 为了尊重工程上的习惯，本章中燃料的元素成分 C、H、O、N、S 等；工业分析成分 W、A、V、C 等；气体分析成分 R_{O_2} 、 CO_2 、 O_2 、 CO 等；各项热损失 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 和热效率等都是把分数乘以 100 后，以百分数来表示。

以可燃质成分作为百分之百，称为可燃基成分；如只把水分变化的因素排除，除去水分以外的其它含量作为成分的百分之百，则称为干燥基成分；如将水分计入后就得到所应用的煤的成分，称为应用基成分；当煤样在试验室的正常条件下放置（即室温20℃，相对湿度60%条件下），煤样会失去一些水分，留下的稳定的水分称为实验室正常条件下的空气干燥水分；以该空气干燥过的煤样为基础的的成分称为分析基成分。用分析基成分可以避免试验中水分的变化影响。

根据不同的成分分析基础，式(1-1)可分别写成

$$(1) \text{ 应用基} \quad C^r + H^r + O^r + N^r + S^r + A^r + W^r = 100 \quad (1-2)$$

$$(2) \text{ 分析基} \quad C^l + H^l + O^l + N^l + S^l + A^l + W^l = 100 \quad (1-3)$$

$$(3) \text{ 干燥基} \quad C^d + H^d + O^d + N^d + S^d + A^d = 100 \quad (1-4)$$

$$(4) \text{ 可燃基} \quad C^k + H^k + O^k + N^k + S^k = 100 \quad (1-5)$$

测定煤中所含C、H、O、N、S各元素、水分和灰分的百分含量的方法，称元素分析法。

2. 煤的工业分析

另一种在工业上常用的分析煤的方法称工业分析。工业分析法测定比元素分析法测定简单，它只需测定煤中所含水分(W)、灰分(A)、挥发分(V)和固定碳(C_{ed})各成分。另外还要测定煤的发热量Q_{dw}、灰熔点、剩余焦炭特征及可磨系数。这种分析煤成分的方法比较简单，适用于发电厂等运行单位对煤质的日常分析。

将煤的试样放在105℃的恒温箱中干燥约1h，所失去的重量份额为水分(W)，煤样放于带有小通气孔的带盖坩锅中，在900℃恒温的马弗炉内隔绝空气加热约7min，煤样因受高温而裂解，放出可燃气体，余下固定碳与灰分(统称焦炭)，此时煤样所失去的重量减去水分后，称为挥发分，以V表示。煤样放入开口坩锅内，并放在马弗炉内燃烧，燃烧后余下的物质为不可燃的灰分，以A表示。放出挥发分后，煤样的残余的百分数减去灰分的百分数，即为固定碳的百分数，以C_{ed}表示，将工业分析的四项成分，即水分(W')、挥发分(V')、固定碳(C_{ed}')与灰分(A')之和表示为100%，即

$$W' + V' + C_{ed}' + A' = 100\% \quad (1-6)$$

同理，煤的工业分析成分也可有应用基，分析基，干燥基，可燃基等。表示如下：

应用基

$$W^r + V^r + C_{ed}^r + A^r = 100\% \quad (1-7)$$

分析基

$$W^l + V^l + C_{ed}^l + A^l = 100\% \quad (1-8)$$

干燥基

$$V^d + C_{ed}^d + A^d = 100\% \quad (1-9)$$

可燃基

$$C_{ed}^k + V^k = 100\% \quad (1-10)$$

这里特别要强调说明煤中可燃基挥发分的含量(V')，它是衡量煤质是否易于燃烧的

要指标。 V' 含量高,表示煤容易着火,也容易燃烧稳定和燃尽。通常在煤的分类中也把 V' 作为重要依据。例如 V' 小于9%的煤称无烟煤,这种煤极其难燃。 $V' > 9\%$ 至19%的煤称为贫煤,比无烟煤易于燃烧些。 $V' > 19\%$ 的称为烟煤、褐煤,它们都比较容易着火和燃烧。褐煤的水分高些,有的含灰也高。

在工业分析中还可对放出挥发分后所剩余的焦炭(固定碳与灰分)鉴定其粘结的程度,称焦结性。焦炭的焦结性强弱程度(简称焦结性)根据煤种不同而异,它对层燃炉的燃烧过程影响较大,而对煤粉炉的燃烧过程则无影响。焦结性很强的煤在炉排上使焦炭形成粘结性很强的焦块,这样,会使煤层通风不均匀,焦块的燃尽也较困难,造成灰渣中含碳量增加、燃烧效率降低。另一些焦结性很弱的煤,在炉排上燃烧时形成松散粉状的焦炭,容易在未燃完前就被通过炉排的空气吹走或落到炉排下造成燃料的损失。

焦炭焦结性特征从粉状至强膨胀熔融粘结共区分成八类^[4]。设计层燃炉炉排时要考虑煤的焦结性特征。

3. 燃料成分基础的换算

固体燃料成分间的相互关系见图1-2。从图中应用基和分析基比较,可看出燃料中的水分有分析基水分 W' ,亦称内在水分 W_{in} (固有水分);还有一部分是外在水分 W_{ex} ,它是空气干燥过程中失去的水分,也称表面水分。两种水分的计算基础不同, W_{in} 的计算基础是分析基,而 W_{ex} 的是应用基。图中 S_p 表示可燃硫, S_{LY} 表示不可燃的硫酸盐硫。

上述四种不同成分基础之间可以通过一定关系换算,换算系数见表1-2。

表1-2 燃料不同成分基础的换算系数

已知成分的基	所 求 成 分 的 基			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	1	$\frac{100 - W'}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y - A^y}$
分 析 基	$\frac{100 - W^y}{100 - W'}$	1	$\frac{100}{100 - W'}$	$\frac{100}{100 - W' - A'}$
干 燥 基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W'}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^y}$
可 燃 基	$\frac{100 - W^y - A^y}{100}$	$\frac{100 - W' - A'}{100}$	$\frac{100 - A^y}{100}$	1

例如,应用基的水分称为全水分,它是内在水分 W_{in} 与外在水分 W_{ex} 之和,由于 W_{in} 是分析基的成分百分数,而 W_{ex} 是应用基的成分百分数,故必须先将 W_{in} (即 W')换算成应用基,再和 W_{ex} 相加得全水分 W^y ,即

$$W^y = W_{ex} + W' \frac{100 - W_{ex}}{100} \quad (1-11)$$

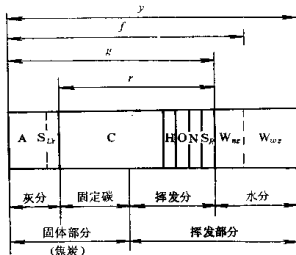


图1-2 固体燃料各种成分间的关系

再如, 某煤样的分析基工业分析成分为

$W' = 1.50\%$; $V' = 25.13\%$; $C'_{ED} = 58.37\%$; $A' = 15.00\%$, 求可燃基工业分析成分。

解得可燃基工业分析 V' 、 C'_{ED} 为

$$V' = \frac{V'}{V' + C'_{ED}} \times 100 = \frac{25.13}{25.13 + 58.37} = 30.10$$

$$C'_{ED} = 100 - V' = 100 - 30.10 = 69.90$$

三、燃料发热量及其换算

1. 燃料发热量

燃料发热量有高位发热量 (Q_{CW}) 和低位发热量 (Q_{DW})。固体、液体燃料发热量的单位是 kJ/kg , 即每千克质量燃料完全燃烧所释放的热量; 气体燃料发热量单位以 $\text{kJ/m}^{3\ominus}$ 表示, 即在标准状态 (273K , 0.1013MPa) 下每立方米气体燃料完全燃烧所释放的热量。当计入燃烧产生的水蒸气汽化潜热时, 称高位发热量, 不计入时称低位发热量。在锅炉计算中通常采用的燃料燃烧所释放的热量为燃料低位发热量, 因为排出的烟气温度较高, 烟气中的水蒸气不能凝结。

煤的发热量可用氧弹测热器测定, 测出的发热量为分析基氧弹发热量 Q'_{ED} , 与 Q'_{DW} 换算式如下:

$$Q'_{DW} = Q'_{ED} - 94.2S' - \alpha Q'_{ED} - 25(W' + 9H') \quad (1-12)$$

式中, Q'_{DW} 、 Q'_{ED} 为分析基低位发热量和氧弹发热量, 单位为 kJ/kg ; α 为氮生成硝酸并溶于水所放出热量的系数, 对贫煤、无烟煤, $\alpha = 0.0042$, 对其它煤种, $\alpha = 0.0063$ 。

当没有氧弹测热器时, 可根据元素分析进行近似计算, 求得发热量。应用基低位发热量 Q_{DW} 计算式如下:

$$Q_{DW} = 339C^* + 1030H^* - 109(O^* - S^*) - 25W^* \quad (1-13)$$

上式计算的准确性与煤中的含灰量有关, 当 $A^* \leq 25$ 时, 计算值与实测值之差 $\Delta Q < 600 \text{kJ/kg}$; 当 $A^* > 25$ 时, $\Delta Q < 800 \text{kJ/kg}$ 。有时这种方法也可用于校核元素分析或所测发热量是否准确。

2. 各种成分基础发热量间的换算

燃料中的水分对高位发热量的影响, 只是占据燃料中一定的质量分数; 而水分对低位发热量的影响, 除占据一定质量分数使发热量降低外, 还要吸收汽化潜热再度降低发热量。因此, 各种成分基础高位发热量间的换算可用表 1-2 的换算系数。对于低位发热量间的换算, 必须考虑水分的汽化潜热, 先换算成高位发热量后, 再用表 1-2 的换算系数换算。各种成分基础低位发热量间的换算见表 1-3。

换算举例:

已知分析基低位发热量 Q'_{DW} , 求应用基低位发热量 Q'_{DW} 。换算如下:

$$\begin{aligned} Q'_{CW} &= Q'_{DW} + 25(9H' + W') \\ Q'_{CW} &= Q'_{CW} \frac{100 - W'}{100 - W'} = [Q'_{DW} + 25(9H' + W')] \frac{100 - W'}{100 - W'} \\ Q'_{DW} &= Q'_{CW} - 25(9H' + W') \\ &= [Q'_{DW} + 25(9H' + W')] \frac{100 - W'}{100 - W'} - 25(9H' + W') \end{aligned}$$

$\ominus \text{ m}^{3\ominus}$ 表示标准状态下的体积单位, 全书同此。

表1-3 各种成分基低位发热量换算式

已知成分	所 求 成 分 的 基			
	应用基	分析基	干燥基	可燃基
应用基	—	$Q_{DW}^f = (Q_{DW}^y + 25W^y) \times \frac{100 - W^f}{100 - W^y} - 25W^f$	$Q_{DW}^d = (Q_{DW}^y + 25W^y) \times \frac{100}{100 - W^y}$	$Q_{DW}^c = (Q_{DW}^y + 25W^y) \times \frac{100}{100 - W^y - A^y}$
分析基	$Q_{DW}^y = (Q_{DW}^f + 25W^f) \times \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25W^y$	—	$Q_{DW}^d = (Q_{DW}^f - 25W^f) \times \frac{100}{100 - W^f}$	$Q_{DW}^c = (Q_{DW}^f + 25W^f) \times \frac{100}{100 - W^f - A^f}$
干燥基	$Q_{DW}^y = Q_{DW}^d \frac{100 - W^y}{100} - 25W^y$	$Q_{DW}^f = Q_{DW}^d \frac{100 - W^f}{100} - 25W^f$	—	$Q_{DW}^c = Q_{DW}^d \frac{100}{100 - A^d}$
可燃基	$Q_{DW}^y = Q_{DW}^c \times \frac{100 - W^y - A^y}{100} - 25W^y$	$Q_{DW}^f = Q_{DW}^c \times \frac{100 - W^f - A^f}{100} - 25W^f$	$Q_{DW}^d = Q_{DW}^c \times \frac{100 - A^d}{100}$	—

$$= (Q_{DW}^f + 25W^f) \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25W^y$$

上述换算式中 W^f 不能通过表1-2中系数直接换算成 W^y ，而必需按表1-3进行换算。

为比较不同燃料的水分、灰分及硫分含量对锅炉工作的影响，科学的办法应该按一定发热量所带入的质量进行比较，即规定按每 4187kJ（即1000kcal）发热量所带入的有关(kg)比较，称为折算含量(kg/MJ)；定义折算水分(W^z)、灰分(A^z)及硫分(S^z)如下：

$$W^z = \frac{W^y/100}{Q_{DW}^y/418.7}, \quad A^z = \frac{A^y/100}{Q_{DW}^y/418.7}, \quad S^z = \frac{S^y/100}{Q_{DW}^y/418.7}$$

其中 W^z 、 A^z 和 S^z 分别为折算应用基水分、折算应用基灰分和折算应用基硫分； Q_{DW}^y 为每千克应用基燃料的低位发热量； W^y 、 A^y 和 S^y 分别为应用基燃料的水分、灰分和硫分百分含量。考虑水分、灰分和硫分对锅炉运行的影响时，采用折算含量比较方便，例如，某锅炉改变煤种，燃料中水分、灰分和硫分都增加，煤的发热量降低，当锅炉仍要保持原蒸发量时，则必须多烧煤，由于多烧的煤量使进入炉膛内的水分、灰分和硫分也相应增加，对锅炉工作的影响也加大，因此使用折算含量比较方便。

§ 1-2 煤 的 分 类

煤的形成和性质随埋藏地质条件及年代远近而不同，埋藏年代越久，煤的碳化程度也越深，含碳量增加，含氢、氧量减少，其燃烧特性也不同。作为锅炉燃烧的动力用煤，通常的分类是依据煤中可燃质挥发分含量 V^y 并参考水分及灰分含量，将其分成无烟煤、贫煤、低挥发分烟煤、高挥发分烟煤、褐煤等（见表1-4）。这种分类在一定程度上能反映燃烧中的特性，比过去长期沿用的按煤的气化、炼焦、煤化工等分类方法好。近年来，不少研究单位都在研究煤的燃烧特性，以便能更多地按煤在燃烧过程中的性能以及对设备设计、运行的影响进行分类。现分别介绍如下。

表1-4 动力燃料用煤的分类方法^{〔1〕}

煤 种	可燃基挥发分含量 $V^* \times 100$	着火及燃烧情况
无烟煤	≤ 9	难着火及燃烧完全
贫煤	$> 9 \sim 19$	较难着火及燃烧完全
中挥发分烟煤	$> 19 \sim 30$	易着火及燃烧完全
高挥发分烟煤	$> 30 \sim 40$	易着火及燃烧完全
褐煤	$> 40 \sim 50$	易着火及燃烧完全

一、按可燃基挥发分 V^* 含量分类

煤的可燃基挥发分含量多少，反映在燃烧过程中煤的化学活性，但同类的煤含水量或灰分多时，也难以着火与燃烧，且发热量较低，这种煤称为劣质煤，如劣质烟煤，劣质无烟煤等。

现将不同种类的煤的特性分述如下：

(1) 无烟煤的地质埋藏年代最久，煤质硬且表面闪光，可燃基挥发分含量最小，挥发分析出的温度也较高，着火较困难，着火后也较难燃尽，含碳量高，水分含量较少，一般发热量也较高。我国无烟煤的储藏量较大，仅次于烟煤，大多分布于华北、西北及中南地区，福建省无烟煤的可燃基挥发分含量最低 ($V^* = 3 \sim 5\%$)。

(2) 贫煤的可燃基挥发分含量较低，一般含水量较少，也较难着火、燃尽，不结焦。

(3) 烟煤的挥发分含量较高，其变化范围也较大，碳化程度较无烟煤浅，其表面呈灰黑色、有光泽且质松软。有的烟煤在受热析出挥发分时会粘结成块，这种结焦性较强的烟煤，可供炼焦工业使用。在选煤的过程中获得的洗中煤、泥煤等劣质煤可作为动力用燃料。烟煤的挥发分含量的变化范围较大，故又分为高挥发烟煤和中挥发分烟煤（见表1-4），水分含量一般为10%。有些烟煤的灰分较多 ($A^* = 40\% \sim 50\%$)，其发热量也较低 ($Q_{\text{低}}^* = 10000 \sim 18000 \text{ kJ/kg}$)，一般称为劣质烟煤。劣质烟煤的水分含量也较多 ($W^* > 10\%$)。

(4) 褐煤的埋藏年代较短，碳化程度低，挥发分含量较高，一般为 $V^* = 40 \sim 50\%$ ，挥发分的析出温度较低，因此着火及燃烧都容易。褐煤质松，呈褐色，含水量较高，一般超过20%，含灰分也较多，故发热量较低 ($Q_{\text{低}}^* = 10000 \sim 20000 \text{ kJ/kg}$)。内蒙、东北及西南等地都产褐煤。

二、我国发电厂用煤的 VAWST 分类标准

上述只按一个特性 V^* 对燃烧用煤进行大致分类的方法，虽然非常简便，但是过于粗糙，不能确切地表明煤在燃烧过程中的多方面的最主要的特性。为了能更合理地利用煤炭资源，也为了给各类烧煤的电站锅炉调配质量适宜的煤种，并有利于按照不同煤质等级设计新的电站锅炉和对已有的锅炉进行合理的技术改造，使国家能得到较大的经济效益和社会效益，1983年水利电力部西安热工研究所和煤炭部北京煤化学研究所共同提出了我国发电厂用煤的国家 VAWST 分类标准^{〔6〕}，现已在我国实施。此分类标准的五个字母 VAWST（如表1-5所示）中的 V 表示煤的可燃基挥发分 V^* 的大小，以下角数码表示分级，即分为 $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ 共 6 级；A 表示干燥基灰分 A^* （或折算应用基灰分 A^* ）的大小，分为 A_1, A_2, A_3 共 3 级；W 表示应用基水分 W^* 的大小，分为 W_1, W_2, W_3 共 3 级；S 表示干燥基全硫 S_6^* （或折算应用基全硫 S^* ）的大小，分为 S_1, S_2, S_3 共 3 级；T 表示灰软化温度 t_2 的

大小,分为 T_{2-1} 、 T_{2-2} 共 2 级。例如,大同烟煤的 $V^* = 32.2\%$, $A^* = 18.45\%$, $W^* = 9\%$, $W^f = 1$, $Q_{DW}^y = 12.2 \text{ MJ/kg}$, $S^* = 0.99\%$, $t_2 = 1280^\circ\text{C}$, 就可查表 1-5 VAWST 分类标准,得出大同烟煤的分类属于 $V_4 A_1 W_1 S_1 T_{2-2}$ 。这说明了大同煤是属于含中挥发分的烟煤(以符号 V_4 表示),含有常灰分 (A_1),常水分 (W_1),低硫 (S_1) 而易结渣 (T_{2-2})。这就比前述单纯用挥发份分类的方法更确切和多方面地说明了煤在燃烧时的特性。如果用 VAWST 分类时,其中某一指标正好在分级数值的边缘,还可以采用辅助分类指标,详见表 1-5。例如,用 V^* 分级时,辅助分类指标是 Q_{DW}^y 值,当某种煤的 Q_{DW}^y 值低于表 1-5 中所示的界限值时,就应划归相应于 V^* 值较低的一级。同理,用 W^* 和 t_2 分级时分别用 V^* 和 Q_{DW}^y 作辅助分类指标。VAWST 分类法是根据电站煤粉锅炉的大量燃烧工况参数和煤质统计资料,采用有序量最优分割法整理,并参照发电厂的实际运行经验得出的,是较好的发电厂用煤的分类方法。

表 1-5 发电厂用煤国家 VAWST 分类标准 (6)

分类指标	分限界限	辅助分类指标 (或代用分类指标)	等级代号	煤种名称
可燃基挥发分 $V^* \times 100$	≤ 6.5	$Q_{DW}^y > 23 \text{ MJ/kg}$	V_0	超低挥发分无烟煤
	$> 6.5 \sim 9$	$Q_{DW}^y > 20.9 \text{ MJ/kg}$	V_1	低挥发分无烟煤
	$> 9 \sim 19$	$Q_{DW}^y > 18.4 \text{ MJ/kg}$	V_2	低中挥发分贫煤
	$> 19 \sim 27$	$Q_{DW}^y > 16.3 \text{ MJ/kg}$	V_3	中挥发分烟煤
	$> 27 \sim 40$	$Q_{DW}^y > 15.5 \text{ MJ/kg}$	V_4	中高挥发分烟煤
	> 40	$Q_{DW}^y > 11.7 \text{ MJ/kg}$	V_5	高挥发分烟煤、褐煤、油页岩
折算应用基灰分 $A_z = \frac{418.7A^*}{Q_{DW}^y} / (\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1})$	≤ 7	或 $A_c \leq 84\%$	A_1	常灰分煤
	$> 7 \sim 13$	$A_c > 84\% \sim 45\%$	A_2	高灰分煤
	> 13	$A_c > 45\%$	A_3	超高灰分煤
应用基水分 $W^* \times 100$	≤ 22	$V^* > 40\%$	W_1	常水分煤
	> 22		W_2	高水分煤
	> 40		W_3	超高水分煤
外在水分 $W_{ex} \times 100$	≤ 8	$V^* \leq 40\%$	W_1	常水分煤
	$> 8 \sim 12$		W_2	高水分煤
	> 12		W_3	超高水分煤
折算应用基硫分 $S_z = \frac{418.7S^*}{Q_{DW}^y} / (\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1})$	≤ 0.2	或 $S_0^f \leq 1\%$	S_1	低硫煤
	$> 0.2 \sim 0.55$	$S_0^f > 1\% \sim 2.8\%$	S_2	中硫煤
	> 0.55	$S_0^f > 2.8\%$	S_3	高硫煤
灰软化温度 $t_2 / ^\circ\text{C}$	> 1350	$Q_{DW}^y > 12.6 \text{ MJ/kg}$	T_{2-1}	不结渣煤
	< 1350	$(Q_{DW}^y \leq 12.6 \text{ MJ/kg 时 } t_2 \text{ 不限})$ $Q_{DW}^y > 12.6 \text{ MJ/kg}$	T_{2-2}	易结渣煤

清华大学对燃用 A^* 很高的煤的煤粉锅炉的运行结果和煤岩分析、热天平分析结果,认为不能完全按表 1-5 进行分类,还应辅助地参照图 1-3 中所示的点划线 (—·—) 来分类 [7]。例如,合山煤的 $V^* = 30.1\%$, $A^* = 52.9\%$, $W^* = 5.0\%$, $W^f = 1.0\%$, $Q_{DW}^y = 6.68 \text{ MJ/kg}$, $S^* = 4.8\%$, $t_2 = 1400^\circ\text{C}$ 。按表 1-5 应分类为 $V_5 A_1 W_1 S_1 T_{2-1}$, 其中 V_5 表示属于中挥发分煤

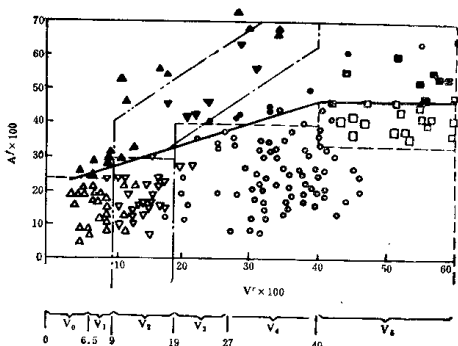


图1-3 电站煤粉锅炉用煤按 V' 和 A' 的分类图⁽⁷⁾

煤。但是，煤岩分析、热天平分析以及实际燃烧情况都表明，合山煤并不属于一般的劣质中挥发分烟煤，而是劣质贫煤。应该按图1-3所示，在 A' 很高时分类的垂直划分线将会倾斜。图中符号▲▼●■分别表示劣质无烟煤、劣质贫煤、劣质烟煤（或洗中煤、洗矸）以及油页岩。

三、工业锅炉用煤的分类

工业锅炉烧煤主要是采用层燃方式，煤的分类在大类上仍以挥发分 V' 区分，而以 V' 区分

表1-6 我国工业锅炉用煤的分类表⁽⁸⁾

工业分析 煤的类别		可燃基挥发分 $V' \times 100$	应用基低位发热量 $Q_{DWP}^l / (MJ \cdot kg^{-1})$	辅助指标	
				应用基水分 $W' \times 100$	应用基灰分 $A' \times 100$
无烟煤	I类	5~10	14.7~20.9	<10	>25
	II类	<5	>20.9		<25
	III类	5~10	>20.9		<25
贫煤		10~20	>18.8	<10	<30
烟煤	I类	≥ 20	10.5~14.7	7~15	>40
	II类		14.7~20.9		<40
	III类		≥ 20.9		<25
褐煤		>40	8.4~14.7	>20	>30
油页岩			<6.3	10~20	>60
石煤和煤矸石	I类		≤ 5.5		>50
	II类		5.5~8.4		
	III类		8.4~11.8		

表1-7 我國部分煤種分析數據

煤種	應用基 水分 W _w	干燥基 灰分 A _f	可燃基元素分析				分析 硫 S _r	應用基低 變熱量 Q _{low} (MJ /kg _w)	可燃基 揮發分 V _r	分析基 水分 W _i	可磨系数 K _{gr}	煤灰灼燒性		
			碳 C _r	氫 H _r	氧 O _r	氮 N _r						變形溫度 t ₁ /°C	軟化溫度 t ₂ /°C	熔化溫度 t ₃ /°C
抚顺	13.0	17.0	78.8	6.1	12.6	1.7	0.8	22.4	46.0	3.5	1.4	1320	>1400	>1400
阜新	17.0~10.0	26.0~18.0	79.3~75.6	5.0~5.1	15.0~12.0	1.3~0.9	1.7~1.4	20.9~16.2	4.0~37.0	11.0~8.0	1.7~1.4	1260~1160	1800~1230	1660~1300
平庄	24.0	28.0	72.0	4.8	20.4	1.0	1.7	14.6	44.0	10.0	1.3	1150	1270	1380
冀西	4.0	20.0	84.5	5.4	8.1	1.5	0.4	25.1	84.0	1.7	1.5	>1500		
大同	7.5	28.0	83.0	4.4	11.1	1.0	0.5	22.0	31.0	0.7		1240	1310	1420
西山	6.0	21.0	91.0	3.6	2.4	1.2	1.8	24.7	16.0	1.0	1.4	1190	1340	1430
开滦	7.0	25.0	83.5	5.2	8.4	1.5	1.4	22.6	34.0	0.9	1.7	>1500		
峰峰	7.0	16.0	88.9	4.5	4.1	1.41	1.0	26.8	18.0	0.9	1.5	1340	>1500	
焦作	7.0	22.0	92.2	3.1	2.8	1.4	0.5	23.9	7.0	1.0	1.2	1310	1370	1420
鹤壁	8.0	17.0	89.4	4.3	4.3	1.6	0.4	20.7	15.5	0.9	1.3	1290	1340	1370
茅田山	12.0~4.0	27.0~18.0	88.4~85.6	5.4~5.2	6.9~5.3	1.6~1.3	0.8~0.5	24.3~23.0	37.0~28.0	1.4~1.1	1.7~1.4	>1500		
金竹山	7.5	24.0	92.5	3.6	2.0	0.9	1.0	22.2	6.7	2.0				
芙蓉煤	6.5	26.0	87.82	3.44	2.16	1.36	5.41	23.1	13.28	0.65	1.2	1220	1300	1390
柳川	6.88	25.3	85.0	5.06	2.85	4.26	2.83	22.8	23.2	1.40	1.50			
孝南焦煤	6.79	17.1	77.16	5.92	13.4	2.12	1.4	23.4	42.56		1.26			
淮南	6.92	22.8	81.4	5.6	10.6	1.48	0.92	22.0	38.52					
淮北煤	9.2	43.0	79.7	6.69	10.92	1.92	0.77	15.8	25.0	1.62	1.3	1350	1450	1520
瀋陽	5.0	25.2	84.4	4.7	3.4	1.8	5.7	23.4	12.6			1200	1310	1405
枣庄南庄														
孔集潘尔	35.42	15.2	73.0	4.85	20.3	0.89	0.96	14.0	43.0	6.24				
开远	31.7	21.2	68.2	3.44	23.4	1.88	3.08	12.4	82.7	11.0	0.88	1175	1140	1170

的类别不细，共分为4大类：无烟煤 $V' < 10\%$ ，贫煤 $V' = 10 \sim 20\%$ ，烟煤 $V' \geq 20\%$ ，褐煤和油页岩 $V' > 40\%$ 。而无烟煤和烟煤又各按发热量的大小细分为I、II、III类（I类常指燃烧情况不好的劣煤，II类为中等煤，III类为好煤），此外又把发热量很低又很难燃烧的石灰和煤矸石又增列为一大类，也按发热量的大小细分为I、II、III类。工业锅炉用煤的上述分类法见表1-6〔8〕。

我国常用的几种主要动力用煤的煤质分析数据列于表1-7。

§ 1-3 液体燃料和气体燃料

一、液体燃料

作为动力用的液体燃料主要是重油和渣油。原油（石油）在常压和一定温度下进行分馏，分馏获得汽油、煤油及柴油等轻质油后所剩下的残渣物称为重油和渣油。常压重油再经减压蒸馏后还能分馏出重柴油和蜡等，其剩余物又称减压重油。重油的成分变化不大，含水量、灰分很少（ $W' = 1\% \sim 3\%$ ， $A' < 1\%$ ），质量好的重油几乎不含水分、灰分；碳氢含量比较高，因此发热量较高（ $Q_{\text{低}} = 37.6 \sim 42 \text{ MJ/kg}$ ），属高热值燃料，硫的含量约为 $0.5\% \sim 3\%$ 。重油的含硫较高时，对锅炉尾部受热面的腐蚀、堵灰和环境污染影响很大。重油在常温下粘性大，燃烧前须加热减低粘性，以便于流动及雾化。重油的运输储存比煤方便，良好的动力燃料。我国的锅炉限制用重油作为燃料，一般只在煤粉炉上用重油或重柴油作为点火用燃料或作低负荷时助燃用。近年来有些煤粉炉装设了煤粉预燃室燃烧器，可以在点火或锅炉低负荷时保持燃烧稳定，因而可以节省大量辅助用油。

重油的主要性质有粘性、密度、闪点、燃点、凝固点、灰分、硫分、机械杂质、发热量和导热系数等。油的运输、储存、雾化和燃烧都受这些特性的影响。

1. 粘性

粘性表示油的流动性，一般用粘度衡量。粘度大则影响燃油的输送和雾化质量，也影响燃烧效率。按流体粘度的规定，动力粘度 μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，运动粘度 ν 的单位为 m^2/s 或 cm^2/s 。在工程上，重油粘度一般仍沿用恩氏粘度，单位为 $^\circ\text{E}$ 。恩氏粘度用恩氏粘度计测定。恩氏粘度是指在实验温度条件下，200mL试验油从粘度计里流出的时间与20°C的200mL蒸馏水流出的时间之比。相同温度下运动粘度 ν 与恩氏粘度 E 之间的换算关系式为

$$\nu = 0.0731 E - \frac{0.0631}{E} \quad (1-14)$$

式中， E 为恩氏粘度数值，单位为 $^\circ\text{E}$ ； ν 为运动粘度，单位为 cm^2/s 。

油的粘度与温度、压力等有关，而温度对粘度的影响最显著。油温升高，油粘度下降。为保证油在管内顺利流动输送，一般要使重油加热。为使雾化良好，进入喷嘴前的油粘度应不大于 $3 \sim 4^\circ\text{E}$ （机械喷嘴）；对于用蒸汽雾化的喷嘴，可以允许油粘度大些（约 $5 \sim 8^\circ\text{E}$ ）。重油在缺氧条件下被加热，会产生热裂解，会在油管内或喷嘴内沉积炭粒，易使喷嘴堵塞。

2. 闪点和燃点

油加热到一定温度会挥发出油蒸汽。在大气压力下，用火焰在油而上掠过，油面出现短促的兰色闪光的最低温度，称为闪点。闪点可在开口或闭口仪器中测定，开口闪点通常比闭

口闪点低 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。闪点是衡量油料是否易于发生火灾的指标。储油罐内的油温应低于闪点温度。

燃点是指燃油被加热到用外来火焰能点着，且能使燃烧时间持续 5° 以上的最低油温。闪点和燃点都是防止火灾，鉴别油着火、燃烧性能的重要指标。

3. 凝固点

凝固点指重油失去流动状态时的温度。以试管中的油倾斜 45° ，经过 $5\sim 10^{\circ}$ 时间内不发生流动的温度来确定。凝固点的高低与油中含蜡量有关。

4. 相对密度

它指 20°C 时单位体积内重油的质量与 4°C 的单位体积水的质量之比，用符号 d_{4}^{20} 表示。

燃油相对密度随温度的变化关系为

$$d_{t}^{t} = d_{4}^{20} - \alpha(t - 20)$$

式中 α 为温度修正系数，见表1-9。

表1-8 部分重油特性

项 目	重 油 牌 号			
	20	60	100	200
恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$				
80 $^{\circ}\text{C}$ 下不大于	5.0	11.0	16.5	
100 $^{\circ}\text{C}$ 下不大于				5.5~9.5
闪点(开口)/ $^{\circ}\text{C}$ 不低于	80	100	120	130
凝固点/ $^{\circ}\text{C}$ 不高于	15	20	25	36
灰分百分含量不大于	0.3	0.3	0.3	0.3
水分百分含量不大于	1.0	1.5	2.0	3.0
硫分百分含量不大于	1.0	1.5	2.0	3.0
机械杂质百分含量不大于	1.5	2.0	2.5	2.5

表1-9 燃油温度修正系数

相对密度 d_{4}^{20}	温度修正 系数 $10^4 \alpha / ^{\circ}\text{C}$	相对密度 d_{4}^{20}	温度修正 系数 $10^4 \alpha / ^{\circ}\text{C}$	相对密度 d_{4}^{20}	温度修正 系数 $10^4 \alpha / ^{\circ}\text{C}$	相对密度 d_{4}^{20}	温度修正 系数 $10^4 \alpha / ^{\circ}\text{C}$
0.8500~0.8600	6.99	0.9100~0.9200	6.20	0.9700~0.9800	5.41	1.0300~1.0400	4.63
0.8600~0.8700	6.86	0.9200~0.9300	6.07	0.9800~0.9900	5.28	1.0400~1.0500	4.50
0.8700~0.8800	6.73	0.9300~0.9400	5.94	0.9900~1.0000	5.15	1.0500~1.0600	4.37
0.8800~0.8900	6.60	0.9400~0.9500	5.81	1.0000~1.0100	5.02	1.0600~1.0700	4.27
0.8900~0.9000	6.47	0.9500~0.9600	5.67	1.0100~1.0200	4.89		
0.9000~0.9100	6.33	0.9600~0.9700	5.54	1.0200~1.0300	4.76		

5. 硫分

国产重油中含硫不等，一般在 $0.5\%\sim 3\%$ 范围内。根据硫的含量，重油可分成高硫油($S^{\circ} > 2.0\%$)、中硫油($S^{\circ} = 0.5\%\sim 2.0\%$)和低硫油($S^{\circ} < 0.5\%$)三种。燃用高硫重油易使锅炉低温受热面腐蚀，而且排烟中含硫量增高，污染环境。

动力用部分重油的特性列于表1-8。

二、气体燃料