

前 言

蒸汽机车自上个世纪问世以来已有百余年的历史,虽然这种机车的热效率不高,但至今仍有一些国家在继续使用着。我国是目前尚在使用蒸汽机车较多的国家之一,而且还有世界上最后一个生产蒸汽机车的工厂。同时,蒸汽机车目前在我国还担负着大部分的铁路货运任务,因此还必须管好、用好蒸汽机车。

从能源的角度来看,近期内我国的能源结构仍然是以煤炭为主,因此节约煤炭必然是节约能源工作中的重要环节。而蒸汽机车又以煤炭为主要燃料,我国机车用煤年近2000万吨,是全国较大用户之一,所以节煤有很重要的意义。如何在已有的基础上,充分地利用各种技术以提高蒸汽机车的热效率,就迫切地需要我国铁路有关燃料、热力部门的科研和技术人员群策群力,为节约煤炭献计献策。

本书是受铁道部机务局的委托,以全路的燃料、热力技术人员和科研人员以及致力于节煤工作的机车乘务人员为对象,主要介绍我国的和一些外国的有关上述领域的技术经验和科研成果。书中广泛地收录了多年来我国和一些国外的试验资料。提供这样一些资料的目的是为了便于读者扩大视野,启发思路,增长知识面,在四个现代化建设中作出积极的贡献。因此,书中提出的办法或措施都是推理性的建议,与铁道部业务主管部门的技术政策和措施在性质上是有区别的。

书中除详细介绍了机车燃料技术以外,对机车用水问题也作了概述。因为从蒸汽机车热力技术的特点出发,煤、水的关联是很密切的,只有全面地了解和处理好用煤、用水的技术问题,才能使机车充分地发挥其功率,达到节约燃料的目的。

因为书内的资料多是我国建国以来的试验资料,单位制的问题仍沿用习惯上常用的单位。但为了符合最近公布的以国际单位(SI)制为主的法定计量单位的规定,书中尽可能在习惯用单位的数值之后,用括号标出相应的法定计量单位的换算值。尽管如此,亦难免有疏漏之处,因此在附录中,对本书有关的SI制单位换算问题作了简要的叙述,供读者参考。此外,书中涉及到较多的经验公式,在这些经验公式中的经验系数往往又与公式中各参数的单位有关,所以在运用这些经验公式时,最好根据导出公式时参数的单位取值,否则将会造成计算误差,甚至得出错误的计算结果。如果读者需要知道法定计量单位的数值,也最好先根据经验公式计算出答案,再按照单位换算的办法换算出法定单位值。

本书在编写过程中得到铁道部机务局杨照久、宋万吉和中国铁道出版社有关领导的鼓励和支持,并得到铁道科学院副研究员黄问盈同志对部分内容提供了很好的建议,在此一并表示谢意。书中插图由王玉芝同志协助完成。本书第一、二、三、四、五、十、十一等章由王黎明执笔;第六、七、八、九章由许寄和执笔。限于笔者的水平,难免有不妥之处,尚希读者批评指正。

编 者

内 容 简 介

本书是根据作者多年从事科学研究所积累的资料,并参考国内外有关技术文献编写而成的。全书共分十一章,其主要内容有:燃料性能及燃料燃烧理论与计算;机车锅炉的热平衡计算;机煤的燃烧及各种并燃技术;机车锅炉用水及炉内水处理;锅炉水垢的形成及其防治措施;蒸汽机车通风理论及其设计计算;燃料消耗及机车的经济操纵法等。

本书适于铁路蒸汽机车专业及燃料、热力工程技术人员培训及自学之用,亦可供有关专业院校师生参考。

蒸汽机车热工技术

王谦明 许贵和 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 林连照 装帧设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京市华东印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 23.25 字数: 568千

1987年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—1,000册 定价: 7.30元

目 录

第一章 燃料及其性能	1
第一节 能源与燃料	1
第二节 燃料的分类与卡当量	4
第三节 煤的生成与分类	6
第四节 煤的组成	11
第五节 煤基准的换算法	19
第六节 煤的发热量	22
第七节 煤灰成分与煤灰熔点	41
第八节 煤的风化与贮存	46
第九节 加工的固体燃料	49
第二章 燃料燃烧的计算	64
第一节 燃烧的物理化学基础	64
第二节 燃料燃烧时所需空气量	68
第三节 燃料燃烧时之过剩空气系数	71
第四节 燃料燃烧时的气体基本方程 (校验方程)	72
第五节 干燃气气体方程图解法	79
第六节 气体方程图解法在机车锅炉燃烧中的应用	84
第七节 燃烧产物量	91
第八节 燃烧产物中干燃气的比热	94
第九节 燃烧中气体燃烧产物及其参数的简易计算法	96
第三章 机车锅炉热平衡的计算	103
第一节 概 述	103
第二节 蒸发率、放热率及蒸发系数	105
第三节 锅炉效率、火室效率及技术当量	109
第四节 锅炉散热损失率	111
第五节 燃料燃烧时燃料成分的变化	117
第六节 化学未完全燃烧热损失率	121
第七节 排烟物理热损失率	121
第八节 机械未完全燃烧热损失率	122
第九节 热平衡方程式的解算及计算示例	123
第十节 用灰平衡法解算锅炉热平衡方程	130

第四章 机煤的燃烧及其经济性	136
第一节 机车用煤的基本要求	136
第二节 混煤燃烧及其效益	137
第三节 颗粒煤燃烧及其效益	148
第四节 型煤燃烧及其效益	153
第五节 煤粉燃烧及其效益	162
第六节 煤的燃烧与蒸汽机车的经济性	164
第五章 蒸汽机车的并燃及其经济性	171
第一节 煤及重油的并燃及其效益	171
第二节 煤及煤粉的并燃及其效益	180
第三节 煤及煤气的并燃	189
第六章 蒸汽机车锅炉用水	202
第一节 天然水及其性质	202
第二节 水中杂质及其对锅炉的影响	205
第三节 锅炉用水的质量标准	207
第四节 锅炉用水与锅炉腐蚀	209
第七章 水垢及水垢的化学清除	216
第一节 水垢的结生过程	216
第二节 水垢的种类及性质	217
第三节 水垢状态的评定	219
第四节 水垢结生速度的测定和计算	221
第五节 水垢的危害性及其防止的途径	223
第六节 锅板温度的测定	225
第七节 水垢的化学清除法	227
第八章 汽水共腾及机车锅炉放水	235
第一节 蒸汽质量及其污染	235
第二节 蒸汽质量试验	236
第三节 汽水共腾的危害性及其防止的途径	240
第四节 机车锅炉放水	241
第五节 化学消沫剂的应用	246
第九章 锅炉内水质处理	249
第一节 水质处理技术标准	249
第二节 水质处理用药剂	250
第三节 水质处理药剂用量的计算	257

第四节	水质处理药剂的配制与投用	260
第五节	水质处理的业务管理	262
第六节	改进药剂配方的试验	266
第十章	蒸汽机车的通风	268
第一节	乏汽喷射过程	269
第二节	喷射过程的计算系数	271
第三节	乏汽的流量和乏汽的热力学性质	272
第四节	乏汽压力的计算	275
第五节	乏汽与燃气的混合过程	281
第六节	混合过程的计算系数	285
第七节	混合气体的扩压过程	296
第八节	通风装置的能量平衡	303
第九节	通风截面当量及锅炉流体阻力	305
第十节	通风装置设计计算	314
第十一章	蒸汽机车燃料消耗	323
第一节	概 论	323
第二节	标准燃料燃烧率	323
第三节	蒸汽机车的基本热工特性	324
第四节	我国一些蒸汽机车的 $Z_0 = f(Y_0)$ 曲线	327
第五节	蒸汽机车的燃料消耗特性	334
第六节	燃料消耗定额的查定	338
第七节	机车的经济操纵法	344
附录一	SI单位的换算	349
附录二	分、秒与十进位小时的换算表	350
附录三	水在不同温度下的密度表	351
附录四	气体的热力学性质	352
附录五	水及蒸汽的物理性质摘录表	353
附录六	水及过热蒸汽物理性质摘录表	354
附录七	主要符号表	355
参 考 文 献		360

第一章

燃料及其性能

第一节 能源与燃料

当前能源问题已是全世界瞩目的问题。由于社会生产高速度地发展，人类生活水平不断地提

高，对能源的消耗量有增无减，因而，一个国家的能源消耗不仅代表着它的工业化发展水平，而且还标志着这个国家国民生活的富裕程度。表1—1是摘录世界银行1980年世界经济发展的统计数字。这些数字是从125个国家和地区的统计数据中综合而来的，人口在一百万以下的国家和地区没有列入。表中将这125个国家和地区划分成五个类别。凡是1978年人均产值*在360美元以下的国家列为低收入发展中国家。凡是1978年人均产值在360美元以上的国家列为中等收入发展中国家。工业化国家主要指资本主义工业化国家。石油输出的五个富裕国单独列为石油输出国，包括伊拉克、伊朗、利比亚、沙特阿拉伯和科威特。劳动力分配项中的农，包括农、林、牧、渔；工包括工、矿、电、水及气等业；商业和其他均属服务业。摘录这些数字的目的，一个是看这五类国家和地区工业发展水平和人民生活水平；另一个是看上述两个水平与能源消耗量的关系。显而易见，工业化国家的每人能源消费约为低收入发展中国家的40倍，约为中收入发展中国家的8倍。但工业化国家的每人每天食物需要量的卡(cal)数仅略高于发展中国家。从劳动力分配的数字来看，工业化国家的工业化程度是比其他国家高得多的。工业化国家的工业和服务业的劳动力分配共占94%，而发展中低收入国家仅为28%。

现根据表1—1的统计数字做基础，算得表1—2。根据1978年的统计，全世界人口为42.47亿人，全世界能源消费总数是86.7亿吨标准燃料，这就是说全世界平均每人的能源消费量是2.04吨标准燃料。其中发展中国家的人口占51.1%，消费的能源仅占11.5%，而工业化国家的人口占15.7%，但消费的能源却占54.4%。这就再次说明工业化发展水平与能源消费的关系了。

如果展望到公元2000年，世界人口增长估计将达60亿人，按目前世界能源消费平均水平来计算，每年需消费的能源就是120亿吨标准燃料。假如低、中收入的发展中国家的工业化和生活能提高到当前世界的平均水平，石油输出国家和实行计划经济的社会主义国家都能达到每人7吨标准燃料的能源消费水平（约相当于目前捷克斯洛伐克7.531吨标准燃料/人和澳大利亚6.622吨标准燃料/人），则全世界能源消费的总量就将是249亿吨标准燃料。这就是

* 人均产值有两种统计方法。一种是包括海外侨民在内的人均产值统计方法，另一种是专指国内本国国民的人均产值统计方法，此处是指后一种统计数字。

说,估计今后20年,世界人口增长50%的情况下,能源的消费则将增篇2~3倍。这一点说明节约能源的世界意义有多么重要。

表1—1 世界各类国家的一些统计数字

国家的类别	人 口 (百万人) 1978年中 $f^{(1)}$	劳动力占% (15~64岁) 1978年 $w^{(2)}$	劳 动 力 分 配 % 1978年w			每人每天食物需要量 (kcal) 1977年 $w^{(2)}$
			农 业	工 业	服务业	
低收入国家	1293.9	55	72	11	17	2952 (8391) $f^{(1)}$
中收入国家	872.8	55	45	23	32	2590 (10844)
工业化国家	667.8	65	6	39	55	3377 (14139)
石油输出国家	60.1	51	42	29	29	2963 (12405)
实行计划经济的 社会主义国家	1352.4	62	49	31	20	2752 (11522)

国家的类别	统计的国家 和地区数 (个) $f^{(1)}$	平均寿命 (年) 1978 $w^{(2)}$	国内每人产值 (美元) 1978 $w^{(2)}$	国内每人能源消费量 (标准燃料公斤) 1978 $w^{(2)}$	城市人口占 总人口 % 1980 $w^{(2)}$	估计到2000 年时人口 (百万人) $f^{(1)}$
低收入国家	38	50	200	161	21	2050
中收入国家	52	61	1250	903	51	1409
工业化国家	18	74	8070	7060	77	736
石油输出国家	5	53	3340	1620	58	104
实行计划经济的 社会主义国家	12	70	1190	2117	36	1730

注 (1) f 表示为总计数字; (2) w 表示为加权平均数字; (3) 括号内为kJ值。

表1—2 世界人口和能源消费的分配

国 家 类 别	1978年人口数		1978年能源消费量		2000年展望的人口数	
	亿 人	%	亿吨标准燃料	%	亿 人	%
低收入国家	12.939	30.5	2.083	2.4	20.50	34.0
中收入国家	8.728	20.6	7.881	9.1	14.09	23.4
工业化国家	6.678	15.7	47.147	54.4	7.36	12.2
石油输出国家	0.601	1.4	0.974	1.1	1.04	1.7
计划经济 社会主义国家	13.524	31.8	28.630	33.0	17.30	28.7
计	42.47		86.715		60.29	

从世界能源储备和能源消耗的比较,也可看出节能的重大意义。据1976年伦敦国际会议的估计:世界石油探明储量约875亿吨,1977年世界石油的产量约为29.7亿吨,按此开采量则30年内将采光。据联邦德国地质研究所的估计,煤炭的世界工业储量(煤层深度在2000m以内,煤层厚度在0.3m以上)约为98000亿吨,但探明储量仅占31%,如按目前技术水平估计可采储量不过5500亿吨,1977年世界煤炭的产量约为34.2亿吨,也只能开采150年左右。以我国的情况而论,我国煤炭的探明储量约6000亿吨,精查储量只有1600亿吨;石油的估计

储量约占世界储量的2%。1985年的产量,煤炭为8.5亿吨,石油为1.25亿吨。通过比较可见我国能源也是很紧张的。

当然,从目前的能源含意来讲,早已超出传统的概念范围了。例如,太阳的辐射能、地热能、潮汐能、风能以及海洋温差能等等都是有利用价值的能源,而且现在已在研究开发的过程之中。习惯上将这些正在试验研究阶段的能源包括原子能在内称为新能源,而将煤炭、石油、天然气等能源叫做常规能源。虽然有人估计新能源的储备是相当可观的,然而就目前已利用的能源来说,常规能源的比重仍然是主要的。不仅如此,可以说在相当长的一段时间内,目前的这种能源结构还将保持在一定的水平上。图1—1是世界银行估计的世界能源结构的现在和未来。图中虚线表示的是石油输出国(OPEC)的分额。正因为常规能源仍居于世界能源中的主导地位,而石油在过去的十多年里又占常规能源中的举足轻重的地位,所以,1973~1974年和1978年以来的两次价格上涨,以及1985~1986年国际石油市场的油价暴跌,震动了世界经济。特别是对能源消费量高的工业化国家和主要的产油国家,这样的大涨大落,冲击更大。

显而易见,无论是过去的所谓能源危机(更确切应该说是石油危机)以及当前的油价暴跌,究其原因,都是由于石油供、求关系间不协调造成的。因此,就世界的长远能源政策而论,仍然是开源和节流的两种办法。这里所说的开源是指开拓新能源,节流是指节约常规能源。对于社会主义国家来讲,开源节流的办法应当是,而且必须是我们的目标。

目前世界上对于开拓新能源方面已在逐步深入。很多的新能源已从试验研究阶段步入到工业上考查的阶段。最有前途的是原子能,但它面临着对环境污染等安全保护问题。这里想着重地提出,找代用燃料也属于开源的一种。例如酒精(乙醇)混合汽油已从使用混合燃料阶段发展到使用纯酒精做为汽车燃料的阶段了。1979年巴西使用了19%的酒精代替了汽油。美国计划到1985年生产20亿加仑的酒精。但是这也并不是不存在某些问题的。巴西的酒精是由甘蔗发酵而来。美国的计划是从玉米和其他谷物中制取酒精,但是20亿加仑的酒精将需要2000万吨玉米和谷物。这相当于美国粮食出口的五分之一。如果一旦要发展这种代用燃料,势必会影响到粮食的供应和价格。当然,在有限的种植而积上如何开展粮食和“粮食燃料”的种植更是一项重大的课题,还有待于进一步的研究解决。

在节流方面(也是目前我国正在大力开展的一项工作),世界上各个国家都做出了成绩,尤其是能源消费量大而又依靠进口能源的国家。例如从1973年到1977年,日本在国内单位产值的能源消费量方面降低了16%,法国降低了13%,联邦德国降低了12%,美国和意大利降低了10%,加拿大降低了9%,英联邦降低了7%。随着大幅度地降低能源消费,日本和西欧的一些国家基本上保持了1973年以来的石油消费总量,美国稍微逊色些,但也基本保持了1978年以来的石油消费总量。

综上所述,能源问题是一项关系国民经济发展的重大课题,而常规能源(燃料)又是能源中主要的来源,因此合理地使用和节约燃料是为人类子孙造福的大计,绝不可等闲视之。

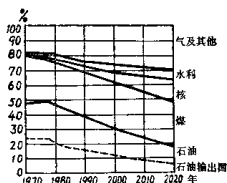


图1—1 世界能源结构的展望

第二节 燃料的分类与卡当量

一、燃料的分类

凡是在燃烧时能放出为人们利用的热能的物质，就叫做燃料。按照燃料的形态和来源可分

为以下的类别：

(1) 固体燃料：

天然固体燃料如木柴、煤炭、页岩等；人造固体燃料如木炭、焦炭等。

(2) 液体燃料：

天然液体燃料如石油；人造液体燃料如柴油、酒精等。

(3) 气体燃料：

天然气体燃料如天然气、油气等；人造气体燃料如水煤气、发生炉煤气等。

还有按照燃料的使用目的来分的，如动力燃料和工业燃料等。通常在动力机械中使用的燃料如煤炭和柴油等都属于动力燃料。在工业炉或化工工业上使用的燃料属于工业燃料。任何一种燃料如果在工业上有使用价值就必需具备以下的条件：

(1) 燃烧时能产生高温并放出大量的热；

(2) 易于被氧化剂氧化；

(3) 自然界中有大量的储存和来源；

(4) 在长期的存贮中能保持其原有的性能；

(5) 燃烧后不产生有害于人类健康或有害于动、植物生存的产物。

这些条件是动力工业上选择燃料的基本原则。尽管在自然界可以找到很多种能放出热能的物质，但是在工业上并不一定都适合做燃料使用。通常，最常用的是那些在燃烧过程中以氧为氧化剂的燃料。所以，一般地说燃料应当是那些能与氧化合的元素组成的物质。

燃料的组成可以是某种或某些化学元素，也可以是由化学元素组成的单质化合物或复杂化合物的混合物。例如，氢是一种元素燃料，酒精就是一种单质化合物燃料，其分子式为 C_2H_5OH 。又例如，发生炉煤气是一种含有一氧化碳、氢及甲烷等化学元素和的单化合物的混合物，煤炭则是由复杂化合物组成的混合物。习惯上把组成燃料的单质化合物叫做燃料的组成成分。用化学分析的方法分析燃料中各单质化合物的含量时叫做燃料的组成成分分析。用化学分析的方法分析燃料中各种元素的含量时叫做燃料的元素分析。在某些情况下，燃料的组成成分也可以就是它的元素组成成分，例如，以氢做燃料时就是这样。

以燃烧为研究的主要目的时，了解燃料的组成成分往往比了解其元素组成成分更为重要，因为燃料的燃烧实际上是由燃料中各单质化合物的燃烧来体现的。燃料中的各单质化合物不论其物理性质或化学性质都与组成该化合物的元素截然不同。举例来说，正十二烷的分子式是 $C_{12}H_{26}$ ，沸点为 $216^{\circ}C$ ，高位发热量是 10520kcal/kg (44045kJ/kg)；而3,3-二乙基异辛烷的分子式仍然是 $C_{12}H_{26}$ ，但结构式不同、其沸点为 $205^{\circ}C$ ，高位发热量是 10500kcal/kg (43961kJ/kg)。写成结构式，正十二烷是 $CH_3-(CH_2)_{10}-CH_3$ ，3,3-二乙基异辛烷是 $(C_2H_5)_3C-(CH_2)_4-CH_3$ 。正十二烷和3,3-二乙基异辛烷都是石油产品的组成成分，这就说明，有的燃料在元素组成方面差异不大，甚至是相同的，但是在燃烧性能和效果方面

却有了区别,其原因就在于此。虽然燃料的组成成分分析是很重要的,但是到目前为止,对很多的燃料,我们还只能概略地了解其组成成分,因此有时我们把组成成分分析叫做近成分分析,其原因就在于此。如按燃料成分分析的相近程度来分,有如下的三个类别。

第一类是具有独立化学和物理特性的燃料或叫做单质燃料。例如气体燃料中的甲烷 CH_4 、氢气等都属于这一类。液体燃料中的酒精、苯 C_6H_6 等也是单质燃料。对于这一类燃料的化学结构和物理特性一般是比较清楚的,因而比较容易地制得单体,对其燃烧特性也了解得比较清楚。

第二类是不同分子量、不同化合物组成的燃料。属于这一类燃料的典型例子就是石油。我们已经知道石油中通常含有三种烃类,即烷烃(石蜡烃),环烷烃和苯属烃(芳香烃)。这三种烃类在石油中有时是以某一种烃为主而存在的叫做单烃石油,有时又是以某两种烃为主而存在的叫做双烃石油。含有三种烃类而且含量大致相等的叫做三烃石油,这一类石油就比较少见。由于目前尚难于把石油中各种烃类的量都测定出来,一般只能在某种馏分中测知其含量。通常以 300°C 以下的馏分所测结果较为准确,所以在上述的单烃、双烃或三烃石油的鉴别上都采用这个馏分的烃类做为依据。由此可见,对于这一类燃料虽然不如第一类燃料的物理化学性能了解得那么清楚,但是可以有个概括的认识并且可以把这三种烃类的分子式和结构式写出来。

第三类是未知或未全知其化学本质和物理特性的化合物组成的燃料。属于这一类的首先就是煤炭,其组成成分比较复杂。

在工程热力计算中,虽然对第二、第三类燃料的组成成分还不是完全地清楚,但是用元素分析的方法也可以满足一般的要求。例如,目前已有很多种计算燃料发热量的半经验经验和公式都是根据燃料的元素分析结果计算的。

做为燃料来说,最重要的一个性能指标就是发热量。燃料的发热量是指单位燃料(1kg 或 1m^3)在完全燃烧后生成的产物冷却到燃料燃烧前的温度时所放出的热量(kcal 或 kJ)。所以燃料的发热量与测定发热量时的温度条件有关。工业上以室温做为测定发热量的标准。用公式来表达如下:

$$\frac{dQ}{dt_i} = \Sigma (G_i c_{pi})_1 - \Sigma (G_i c_{pi})_2 \quad (1-1)$$

式中 $\Sigma (G_i c_{pi})_1$ ——燃料燃烧前各组分的热含量总和;

$\Sigma (G_i c_{pi})_2$ ——燃料燃烧后产物中各组分的热含量总和。

但在实际情况下,燃料燃烧后很少能使燃烧产物冷却到燃烧前的温度条件,所以燃烧后燃烧产物就带走部分燃烧时生成的热量。如以前者的定义称为高位发热量,则该发热量是燃料的真发热量,用 Q_{GW} 表示。考虑到实际应用时的条件,则后一个定义称为燃料的低位发热量或叫实用发热量,用 Q_{DW} 表示。一般地说,燃料燃烧产物的比热虽与燃烧产物的温度有关,但受温度的影响不大,而燃料燃烧后生成的蒸汽在通常的应用条件下却跨越了气—液两相,其潜热值是很大的。故

$$Q_{\text{GW}} - Q_{\text{DW}} = r G_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-2)$$

式中 r ——燃料燃烧后生成的蒸汽冷却到 20°C 时放出的热量, kcal/kg (kJ/kg);

$G_{\text{H}_2\text{O}}$ ——每公斤燃料产生的蒸汽量, kg/kg 。

因为蒸汽来源于燃料中的水分和氢的燃烧,故

$$G_w^0 = \frac{18.016}{2.016} \cdot \frac{H}{100} + \frac{W}{100} \approx \frac{9H+W}{100} \quad (1-3)$$

式中 H ——燃料中的氢含量，%；

W ——燃料中的水分，%。

如果取蒸汽的气化潜热为 538 kcal/kg (2252 kJ/kg)，蒸汽的比热为 $0.48 \text{ kcal/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ ($2.01 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$)，则

$$\tau = 538 + 80 - (100 - 20) \cdot 0.48 = 579.6 \text{ kcal/kg} (2426.7 \text{ kJ/kg}) \approx 600 \text{ kcal/kg} (2500 \text{ kJ/kg})$$

一般用高位发热量来表示燃料的燃烧性能。

二、卡当量

自然界的燃料品种是多种多样的，而且各种燃料的高位发热

量相差悬殊，所以在统计或比较燃料的技术经济价值时需要一个标准尺度。这个尺度就叫做标准燃料。所谓标准燃料是一种假想的燃料，其发热量规定为 7000 kcal/kg 或 kcal/m^3 (29308 kJ/kg 或 kJ/m^3)。有了这样一个标准，就可以把任何一种燃料的数量折算成标准燃料的数量。通常将某燃料的高位发热量与标准燃料的发热量之比叫做燃料的换算当量或卡当量，用 $\varnothing_c$ 表示。

$$\varnothing_c = \frac{Q_{GW}}{Q_B} = \frac{Q_{GW}}{7000} \quad (1-4)$$

式中 Q_B ——标准燃料发热量。

举例来说，如有某燃料，其发热量为 10000 kcal/kg ，即卡当量 $\varnothing_c = \frac{10000}{7000} = 1.43$ 。即是说该燃料每吨的热值相当于 1.43 吨标准燃料的热值。如果需要知道某天然燃料在等热值下折合多少标准燃料，则将该天然燃料的质量乘该燃料的卡当量即得标准燃料的质量。卡当量常用于国家计划和统计部门，如前节中表 1-1 的一些数据即采用了标准燃料的概念。

第三节 煤的生成与分类

前两节对能源和燃料的概念，范围及其重要性做了概括的

叙述，煤炭在其中的地位和重要性也就显而易见了。煤炭是属于第三类组成成分复杂的燃料。在我国煤炭资源丰富，品种齐全，是目前使用很广泛的燃料。

关于煤炭的成因，一般说法认为在太古时期古生植物经地壳的变迁，埋藏在地下，植物中的纤维经细菌的生化作用，逐步地放出二氧化碳、水和甲烷等气体，再经地压和地热的作用，而形成富于碳质的煤炭。这种作用叫数煤化。我国从明代开始就不断地有人在研究其成因。清（乾隆年间）、檀萃在所著《滇海虞衡志》中就曾提出在煤层底板中发现有远古树木化石。这比美国人罗根（1841年）在欧洲发现煤层底板中有植物遗体要早若干年。

古生植物经煤化两成煤层有两种理论。一是煤的原地生成学说，即繁茂的植物在地下或水中埋没后经煤化而形成的原地煤层。另一种是煤的流积生成学说，即植物被江河冲积到三角地带后经煤化而形成的流积煤层。一般地说，原地煤层的面积大、厚度均一、煤层成平行的多层状，并可在煤层底部发现植物化石；流积煤层的面积较狭、厚薄不定、呈很多的带层，在煤层的底部有粘土层但很少发现化石。

煤的生成年代可由夹在煤层中的地质岩石和化石来判断，其关系大致如表 1-3 所列。

在成煤过程中,植物体中含有纤维、木素及树脂三种主要成分,其中纤维及木素形成煤质,树脂则形成沥青质。为了证实上述的说法,国外曾有人(Bert及Schmidt)用人工的方法在高温高压下将木质纤维经饱和食盐水浸泡制成煤质的成分。

表1-3 地质与煤炭的成煤年代

代	纪	世	同位素年龄(百万年)	煤 的 牌 号
新生代 (K ₂)	第四纪 (Q)	冲积世	0.015	泥煤
		洪积世	2.5	泥煤及褐煤
	第三纪 (R)	(上新世) 鲜新世		褐煤
		中新世	25	褐煤
		渐新世		褐煤
		始新世	67	褐煤
中生代 (M ₂)	白垩纪 (K)		137	褐煤、长焰煤、气煤
	侏罗纪 (J)		195	长焰煤、气煤、烟煤
	三叠纪 (T)		230	烟煤、无烟煤
古生代 (P ₂)	二叠纪 (P)		285	焦煤、无烟煤
	石炭纪 (C)		350	焦煤、无烟煤
	泥盆纪 (D)		400	无烟煤
	志留纪 (S)		440	石煤
	奥陶纪 (O)		500	石煤
	寒武纪 (C _M)		570	石煤
元古代 (P ₁)	震旦纪 (Z)		2400	石煤

由于煤炭的生成与地质年代和古生植物的类别紧密相关,所以对煤炭的分类也颇为复杂。

最早研究煤炭分类的是我国明代,据《天工开物》书中宋应星提出的一种分类法,将煤分为明煤、碎煤及末煤三大类。碎煤又分为饭炭及铁炭,铁炭即现代分类法中的炼焦煤。他的分类法就是根据煤的挥发分和粘结性来分的,这同现行的工业分类法很近似。目前世界各国的分类方法大致有以下四种形式:

- (1) 自然分类或成因分类;
- (2) 煤化程度分类或科学分类;
- (3) 工业分类;
- (4) 用途或商业分类。

我国从1986年开始,将实行新的煤炭分类方法。新的煤炭分类法如表1-4所列。其中,弱粘煤、长焰煤、气煤都是动力用煤。贫煤和无烟煤除可做动力用煤外,主要是作民用煤。

在煤炭分类表中,未列入的有石煤和泥煤两种。

石煤,因其比重大,硬度高,固定碳少,发热量低,外观像黑色的石头,故不列入。这种石煤因生成年代久远,煤质中各种成分的变化范围较大,有的石煤应用基低位发热量只有

和H⁺值,按规范确定出不受。

***对V_d>37.0%, G_{R,t}≤5的煤,再按P_{st}确定其为长焰煤或褐煤。如P_{st}>30~50%,再测Q_{net,w},如>5700 cal/g,则应划分为长焰煤。地质勘探煤样,对V_d>37%、焦渣特征为1~2号的煤(在不压饼的条件下测定),再用P_{st}来区分烟煤和褐煤。

注1. 分类用煤样,除A_{st}≤10.0%的采用原煤样外,凡A_{st}>10.0%的各煤样,应采用ZnCl₂重液洗后的浮煤(对重液洗法洗煤样,应同时测定其可能的重液损失)。注2. G_{R,t} 474-52煤样的测定方法。

500~1000kcal/kg (2093~4187kJ/kg)，而有的石煤却可达4000~5000kcal/kg (16747~20934kJ/kg)。但我国近几年勘探，相继发现了大量的石煤资源，尤其是储藏在缺煤的南方各省，因此，对调节使用燃料资源来说，还是有实用价值的。特别是开展沸腾炉的研究以后，可以使用石煤做为燃料。

表1—4 中国煤炭分类方案 (GB5751-86)

类 别	代 号	数 码	分 类 指 标						
			V, %	$G_{R.T.}$	y_{max}	b%	H, %	P_M , %	$Q_{GR}^{cal/g}$
无 烟 煤	WY	01	≤ 3.5				≤ 2.0		
		02	$> 3.5 \sim 6.5$				$> 2.0 \sim 3.0$		
		03	$> 6.5 \sim 10.0$				> 3.0		
贫 煤	PM	11	$> 10.0 \sim 20.0$	≤ 5					
瘦 贫 煤	PS	12	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 5 \sim 20$					
瘦 煤	SM	13	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 20 \sim 50$					
		14	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 50 \sim 65$					
焦 煤	JM	15	$> 10.0 \sim 20.0$	> 65	≤ 25.0	≤ 150			
		24	$> 20.0 \sim 28.0$	$> 50 \sim 65$					
		25	$> 20.0 \sim 28.0$	> 65	≤ 25.0	≤ 150			
1/3 焦煤	1/3JM	35	$> 28.0 \sim 37.0$	> 65	≤ 25.0	≤ 220			
肥 煤	FM	16	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 85^*$	> 25.0	> 150			
		26	$> 20.0 \sim 28.0$	$> 85^*$	> 25.0	> 150			
		36	$> 28.0 \sim 37.0$	$> 85^*$	> 25.0	> 220			
气 肥 煤	QF	46	> 37.0	$> 85^*$	> 25.0	> 220			
气 煤	QM	34	$> 28.0 \sim 37.0$	$> 50 \sim 65$					
		43	> 37.0	$> 35 \sim 50$					
		44	> 37.0	$> 50 \sim 65$					
		45	> 37.0	> 65	≤ 25.0	≤ 220			
1/2 中 粘 煤	1/2ZN	23	$> 20.0 \sim 28.0$	$> 30 \sim 50$					
		33	$> 28.0 \sim 37.0$	$> 30 \sim 50$					
弱 粘 煤	RN	22	$> 20.0 \sim 28.0$	$> 5 \sim 30$					
		32	$> 28.0 \sim 37.0$	$> 5 \sim 30$					
不 粘 煤	BN	21	$> 20.0 \sim 28.0$	≤ 5					
		31	$> 28.0 \sim 37.0$	≤ 5					
长 焰 煤	CY	41	> 37.0	≤ 5				> 50	
		42	> 37.0	$> 5 \sim 35$					

续上表

类 别	代 号	数 码	分 类 指 标						
			V %	G _{R.I.}	y _{mm}	b %	H ^{**} %	P _M ^{***}	Q _{GW} ^{4.6N} cal/g
褐 煤	HM	51	>37.0					≤30	
		52	>37.0					>30~50	≤5700

* 当 $G_{R.I.} > 85$ 时, 再用 y (或 b) 值来区分肥煤、气肥煤与其他煤类的界限, 当 $y > 25.0 \text{ mm}$ 时, ① 如 $V^* \leq 37.0\%$ 则为肥煤, ② 如 $V^* > 37.0\%$ 则为气肥煤; 当 $y \leq 25.0 \text{ mm}$ 则根据 V^* 的大小划分为其他煤类。

如果用 b 值来划分肥煤、气肥煤与其他煤类界限时, ① 如 $V^* \leq 28.0\%$, 暂定 $b > 150\%$ 为肥煤, ② 如 $V^* > 28.0\%$, 暂定 $b > 220\%$ 为肥煤或气肥煤 ($V^* > 37\%$)。

当按 b 值划分的类别与 y 值划分的类别有矛盾时, 以 y 值划分的为准。

** 如用 V^* 与 H^* 划分的小类类别有矛盾时, 以用 H^* 划分的小类类别为准。在已确定了无烟煤小类的生产厂、矿的日常检测中, 可按 V^* 来分类; 在煤田地质勘探工作中, 对新区确定小类或生产厂、矿需要重新核定小类时, 应同时测定 V^* 和 H^* 值, 按规定确定出小类。

*** 对 $V^* > 37.0\%$, $G_{R.I.} \leq 5$ 的煤, 再按 P_M 确定其为长焰煤或褐煤。如 $P_M > 30 \sim 50\%$, 再测 $Q_{GW}^{4.6N}$, 如 $> 5700 \text{ cal/g}$, 则应划分为长焰煤。地质勘探煤样, 对 $V^* > 37\%$ 、焦渣特征为 1~2 号的煤 (在不压饼的条件下测定), 再用 P_M 来区分烟煤和褐煤。

注1. 分类用煤样, 除 $A^* \leq 10.0\%$ 的采用原煤样外, 凡 $A^* > 10.0\%$ 的各煤样, 应采用 $ZnCl_2$ 重液选后的浮煤 (对易泥化的低灰度褐煤, 可采用灰分尽可能低的原煤样), 详见 GB474-83 煤样的制备方法。

注2. $G_{R.I.}$ 称为 G 指数, 是表示烟煤结性的一种指标, 其特点是按罗加指数测定原理改变无烟煤粒度与配比, 使烟煤和标准无烟煤混合后焦化, 并用转鼓试验测定其所得焦炭的强度。该指标是我国对罗加指数测定改进后的新指标。

注3. P_M 称为煤的透光率, 对低灰化度的煤如褐煤、长焰煤, 在测定条件下用硝酸与磷酸混合液处理后所得溶液对光的透光度。

注4. b 称为膨胀度, 是把煤样按规定方法压成一定长度的煤笔, 在控制膨胀管中以一定升温速度升温, 由煤笔上的压杆记录煤样在管中的体积变化, 其膨胀最大距离占煤笔长度的百分数是膨胀度。

注5. $Q_{GW}^{4.6N}$ 称为含水无灰基高位发热量, 是国际上用来划分褐煤及烟煤类别的一项指标。

泥煤也是一种可做为燃料使用的资源, 我国也有大量的存在, 如黄淮平原、松辽平原以及青藏高原等地都有不同类型的泥煤。泥煤可分为草本泥煤、木本泥煤和苔藓泥煤三类。

除此以外, 我国还有一些特殊煤种, 例如抚顺的煤精, 挥发分超过 $80 \sim 90\%$; 山东黄县的一种煤, 挥发分超过 60% , 发热量可达 8000 kcal/kg (33494 kJ/kg) (可燃基); 江西乐平煤矿鸣山矿的树皮残植煤, 焦油产率可达 $16 \sim 20\%$, 胶质体很高。这些特殊煤种因与燃料工业燃烧的关联不大, 但加工工业上经济价值很高, 故只提及以广眼界。

根据上述煤种, 我国按煤炭产品的用途和加工方法及质量分为五大类规格, 二十九个品种。其规格见表 1-5。精煤为经洗煤厂加工供炼焦用的精选煤炭产品。粒级煤为经过洗选或筛选加工, 清除了大部分或部分杂质与矸石, 粒度下限在 6 mm 以上的煤炭产品。洗选煤为经过洗选或筛选加工, 清除了大部分或部分杂质与矸石, 粒度上限在 50 、 25 、 13 或 6 mm 以下的煤炭产品。原煤为煤矿生产出来未经洗选、筛选加工而只经人工拣矸的煤炭产品。低质煤是指灰分大于 40% 的各种煤炭产品 (包括灰分在 $16.0 \sim 40\%$ 的煤泥或水采煤泥和灰分大于 32% 的中煤)。

各种规格的煤炭产品按不同的灰分 (干燥基) 定级, 冶炼炼焦精煤或简称冶炼精煤划分为十五个等级; 其他炼焦精煤简称其它精煤划分为七个等级; 其他煤炭产品划分为二十五个等级如表 1-6 所示。各种煤炭都按煤的分类与灰分的等级来命名。例如: 某焦煤经洗煤厂洗选成精煤, 灰分在 $9.51 \sim 10.0\%$ 之间时, 则称为十级冶炼炼焦精煤; 又如无烟煤, 粒度为 $25 \sim 50 \text{ mm}$, 灰分在 $22.01 \sim 24.0\%$ 之间, 则称十四级中块无烟煤。

从以上的标准中可知, 对其他煤炭产品的灰分含量划分等级时, 灰分 $\leq 12\%$ 的, 每等级煤的灰分间隔为 1% , 灰分在 $> 12 \sim 40\%$ 的, 每等级间隔为 2% , 灰分 $> 40 \sim 49\%$ 的, 每等级间隔为 3% 。我国统配煤炭产品中最大灰分为 49% 。

目前国内还没有一个完整的针对各种用户要求的评价煤质优劣的标准。例如对动力用煤

的煤质来说应当考虑动力的效益而规定一定质量的煤炭,尤其是机车动力锅炉与一般的固定动力锅炉不同,燃烧强度的波动性较大。现在国外对环境保护非常重视,对动力锅炉用煤的含硫量有一定的规定,一般不超过1%,如果用高含硫的煤炭做动力燃料就必需装设烟尘脱硫设备以减少对环境的污染。可以预见,随着我国四个现代化的发展,制订煤炭产品标准和针对不同用户的煤炭质量标准将被提到议事日程上来。

表1-5 我国煤炭产品规格表

产 品 类 别	品 种 名 称	规 格		注
		粒 度 (mm)	A+灰分(%)	
1. 精 煤	冶炼炼焦精煤	<50, <80 或 <100	≤12.50	
	其他炼焦精煤	<50, <80 或 <100	12.51~16.0	
2. 粒 级 煤	洗中块	25~50, 20~60	≤40	
	中 块	25~50	≤40	
	洗混中块	13~50, 13~80	≤40	
	混 中 块	13~50, 13~80	≤40	
	洗混块	>13, >25	≤40	
	混 块	>13, >25	≤40	
	洗大块	50~100, >50	≤40	
	大 块	50~100, >50	≤40	
	洗特大块	>100	≤40	
	特 大 块	>100	≤40	
	洗小块	13~25, 13~20	≤40	
	小 块	13~25	≤40	
	洗粒煤	6~13	≤40	
	粒 煤	6~13	≤40	
3. 洗 选 煤	洗原煤	不 限	≤40	
	洗混煤	0~50	≤32	动力煤洗煤厂的洗混煤灰分≤40
	混 煤	0~50	≤40	
	洗混末煤	0~25, 0~20	≤40	
	混 末 煤	0~25	≤40	
	洗 末 煤	0~13	≤40	
	末 煤	0~13	≤40	
	洗粉煤	0~6	≤40	
	粉 煤	0~6	≤40	
4. 原 煤	原煤, 水采原煤	不 限	≤40	
5. 低 质 煤	原 煤	不 限	≥40~49	
	中 煤	0~50	≥32.01~49	
	煤 泥 (水采煤泥)	0~1	≥16.01~49	

表1—6 煤炭产品分级表

级 别	A* 灰 分(%)			级 别	A* 灰 分(%)		
	冶炼炼焦精煤	其他炼焦精煤	其他煤炭产品		冶炼炼焦精煤	其他炼焦精煤	其他煤炭产品
一	5.01~5.5	12.51~13.0	4.01~5	十四	11.51~12.0		22.01~24
二	5.51~6.0	13.01~13.5	5.01~6	十五	12.01~12.5		24.01~26
三	6.01~6.5	13.51~14.0	6.01~7	十六			26.01~28
四	6.51~7.0	14.01~14.5	7.01~8	十七			28.01~30
五	7.01~7.5	14.51~15.0	8.01~9	十八			30.01~32
六	7.51~8.0	15.01~15.5	9.01~10	十九			32.01~34
七	8.01~8.5	15.51~16.0	10.01~11	廿			34.01~36
八	8.51~9.0		11.01~12	廿一			36.01~38
九	9.01~9.5		12.01~14	廿二			38.01~40
十	9.51~10.0		14.01~16	廿三			40.01~43
十一	10.01~10.5		16.01~18	廿四			43.01~46
十二	10.51~11.0		18.01~20	廿五			46.01~49
十三	11.01~11.5		20.01~22				

第四节 煤 的 组 成

煤的组成比较复杂,目前对其化学结构还不是十分清楚。为

了使用的方便,一般对煤炭做如下的一些分析。

一、煤的工业分析

煤的工业分析是一种以工业使用为主要目的而进行的分析,所以也叫做煤的实用分析或

煤的技术分析。其分析的项目包括煤的外在水分、内在水分、全水分、挥发分、固定碳、全硫及各种硫和发热量等。有时将煤的水分、灰分、挥发分和固定碳的分析叫做煤的半工业分析。如果将煤的半工业分析再加上硫及发热量等分析就叫做全工业分析。

关于煤的工业分析法,各个国家都有国家标准,这里不做介绍。本文只介绍各个分析项目的意义和内容。

概括起来说,煤的工业分析是了解煤的性质和经济价值的一种方法。例如煤中的水分和灰分高,就会降低煤的发热量,其经济价值就减小。又例如煤的固定碳含量的高低是评价制造合成气的主要指标。这些都是以工业分析为基础评价煤质的方法。现将煤的工业分析项目简述如下:

1. 水 分

煤中水分的变化范围很大,并且与煤化过程有关。例如泥煤中的水分含量就大,而无烟煤中的水分含量就小。煤中的水分有外在水分和内在水分之分,除此以外还有结晶水分。

外在水分是煤在运输、采掘或存储过程中由外界浸入的水分。这种水分也叫做湿分,用

W_{wz} 来表示,是附着在煤粒表面上的一种水分。在空气干燥状态下,温度在 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ 时就可以蒸发出来。因此外在水分含量的多少与外界因素有关,实际分析时是使煤样在空气中与大气湿度达到平衡时所失去的水分叫外在水分。

内在水分是煤粒中毛细孔吸附着的水分,是煤在成煤过程中形成的,所以它也与煤化程度有关。煤中的内在水分需在 105°C 的温度下才可以从煤中分离出来。分析这种水分时,在干燥箱内将恒温温度调到 $102^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{C}$,使煤样达到恒重后测得的水分,用 W_{wz} 来表示。

由煤的外在水分和内在水分构成煤的全水分或总水分,用 W_a 来表示。

结晶水是以化合的方式含在煤的矿物质之中的一种水分,例如硫酸钙($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$),高岭土($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)中的结晶水。这种水分在 $102^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{C}$ 的温度下也很难析出,通常是伴随着煤的受热分解才能分离出来。其析出温度要看煤中所含的矿物质的种类而定,有时需要高达 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 的温度。测定煤中的结晶水分时是在煤与空气完全隔绝的情况下测定的。一般在煤的工业分析时不做这项测定。

煤中的水分对燃烧来讲没有好处。由于水的存在,煤中可燃质的相对含量就要减少,因而煤的高位发热量就会降低。同时水分在蒸发时要消耗热量,所以煤的低位发热量也要降低。此外,在运输过程中,还会增加无益的运耗,冬季时,由于冻结,更会增加运输中的困难。虽然如此,往往在机车上烧煤时反面要适当地洒水,这是因为适当的洒水可以使末煤的颗粒彼此互相粘结起来,在煤投到炉床上的瞬间不致被强烈的通风将末煤带走。

实际情况是,洒水的水分与煤中的含水分有原则的区别。洒水只起到增加煤末的表面粘结作用,而煤中的含水分,特别是内在水分是煤中的固有成分,起不到粘结煤末的作用。两者的性质不同,其作用也不相同。煤上的洒水要有时间性,最好在使用前约半个小时内洒水,过早则洒上的水分蒸发或渗透到煤的毛细孔中,过晚则洒上的水不均匀,起不到粘结的作用。

2. 灰 分

煤中的灰分是指煤在完全燃烧后残留下来的残渣。煤中的灰分来源于煤中的矿物质。煤中的矿物质又有两种来源:一种来源是在成煤过程中,原生植物所固有的矿物质和混入到煤中的矿物质。由这种矿物质形成的灰分叫做内在灰分;另一种来源是在采掘、运输或贮存的过程中由外界混入到煤中去的矿物质,由这种矿物质形成的灰分叫做外在灰分。

煤的内在灰分含量很少,因为原生植物的灰分就很少,通常不足 1% ,但分布均匀,一般用人工方法很难将其除去。面外在灰分含量较多,而且分布极不均匀,一般用人工的方法,例如拣矸,洗选或浮选的方法就可以将这种矿物质分离出来。

在工业分析中,对于以上两种灰分不做单独的分析。通常是在 $815^{\circ}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温度下,使煤完全燃烧,在达到恒重时的残渣称重后所得的质量即两种灰分的合重。

煤中灰分的性质与煤田所在地的地质条件有很大关系。在含石灰岩较多的地方,煤中碳酸盐矿物质含量也高;在含硫铁矿较多的地方,煤中硫化铁矿物质含量就大。但必须明确,煤中的灰分与煤中的矿物质应有所区别。因为煤中的矿物质在 815°C 的高温下要分解、氧化,析出气体而产生质量上的变化。例如,粘土、石膏等将失去其结晶水,碳酸盐将析出 CO_2 ;硫化铁将析出 SO_2 ;析出的 SO_2 如遇煤中的碳酸盐又将生成硫酸盐而析出 CO_2 。

工业上可以用经验公式的方法从煤的灰分中估算其矿物质含量。如B.C.克雷姆经验公式适用于含碳酸盐、硫酸盐和氧化铁等较少的煤。其式如下:

$$M = 1.10A + 0.5S_{Lr} \quad (1-5)$$

式中 M ——煤中矿物质含量, %;