

热工手册

第一卷 第二分册

〔苏联〕O·Γ·格拉西莫夫教授等主编

中国工业出版社

72.54073
466
=1-2

热 工 手 册

第一卷 第二分册

〔苏联〕С·Г·格拉西莫夫教授等主编

罗 仲 卓 宁 施燮钧译

苏联高等教育部批准作为动力学院和工业大学的教材

1995/27

中 国 工 业 出 版 社

本书为苏联 С. Г. 格拉西莫夫教授等主编的“热工手册”第一卷第二部分热能动力学中的锅炉部分。热能动力学中的汽轮机部分已于1960年3月由水利电力出版社翻译出版。

本书主要介绍动力燃料、燃料的燃烧及燃烧装置、锅炉机组、水处理、水规范和水处理的化学监督、蒸汽动力设备腐蚀等有关的各种数据和设计计算资料。为了便于读者参考，关于燃烧室热力计算、锅炉设备通风计算、锅炉元件强度计算等计算方法，均由译者结合当前情况以附录形式作了说明和注释。

本书可供高等动力院校锅炉专业的教师、学生和从事动力锅炉设计制造的工程技术人员参考。

С. Г. Герасимов и др.
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ТОМ I
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1957

* * *

热 工 手 册
第一卷 第二分册
罗 仲 卓 宁 施燮钧译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张207/8·插页1·字数494,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—5,230·定价(科七)3.20元

*

统一书号: 15165·2806(水电-372)

601/103/2

目 录

第一卷 第二分册 热能动力学

第一篇 燃料、锅炉设备、水处理

第八章 动力燃料	1
8-1. 一般知識.....	1
8-2. 燃料的可燃质.....	3
8-3. 燃料的水分.....	4
8-4. 燃料的矿物质部分.....	6
8-5. 燃烧发热量.....	8
8-6. 固体燃料.....	11
8-7. 液体燃料.....	33
8-8. 气体燃料.....	35
8-9. 燃料的取样与縮分.....	39
第九章 燃料的燃烧及燃烧装置	43
A. 燃料的燃烧.....	43
9-1. 燃料在蒸汽锅炉燃烧室中燃烧时其燃烧产物的計算.....	43
B. 燃烧装置.....	48
9-2. 一般知識.....	48
9-3. 炉排炉.....	49
9-4. 煤粉制备.....	63
9-5. 室燃炉.....	83
第十章 锅炉机组	108
10-1. 現代锅炉机组的布置原則.....	108
10-2. 热力計算.....	121
10-3. 流体动力計算.....	157
10-4. 水规范与汽水分离装置.....	181
10-5. 通风計算.....	207
10-6. 锅炉元件强度計算.....	226
附录 I 关于燃烧室热力計算方法的某些修正意見.....	236
附录 II 关于锅炉设备通风計算的某些修正意見.....	239
附录 III 关于锅炉元件强度計算的某些修正意見.....	251
第十一章 水处理	256
11-1. 概述.....	256
11-2. 水品质的技术指标.....	258
11-3. 水中粗分散状杂质和胶状杂质的除去.....	260
11-4. 用沉淀法处理水.....	265
11-5. 用离子交换法处理水.....	273

11-6. 水的炉内化学处理.....	287
11-7. 水的炉内热力处理.....	289
11-8. 循环水和热力网补充水的处理.....	291
第十二章 水规范和水处理的化学监督.....	293
12-1. 概述.....	293
12-2. 化学监督用的仪器和方法.....	293
12-3. 对饱和蒸汽和过热蒸汽品质的监督.....	297
12-4. 对炉水品质的监督.....	298
12-5. 对给水品质的监督.....	301
12-6. 对冷却水(循环水)品质的监督.....	306
12-7. 对于热力网补充水品质的监督.....	307
12-8. 汽鼓式锅炉的热力化学试验.....	308
第十三章 蒸汽动力设备的腐蚀.....	311
13-1. 腐蚀过程.....	311
13-2. 腐蚀损坏的形态.....	315
13-3. 评定金属和合金对腐蚀的稳定性的方法.....	315
13-4. 设备结构上的缺陷对腐蚀速度的影响.....	318
13-5. 金属和合金在各种介质中的腐蚀稳定性.....	318
13-6. 蒸汽动力设备的腐蚀.....	325
13-7. 防止腐蚀的方法.....	327
附录 用来自金属表面上取下腐蚀产物的某些试剂.....	328

第一卷 第二分册 热能动力学

第一篇 燃料、锅炉设备、水处理

第八章 动力燃料

8-1. 一般知识

固体、液体和气体燃料的一般分类详见表 8-1。

在研究燃料的性质时，我们把它们区别为有机质、可燃质、干燥质和工作质。上述每一种燃料质的成分都是用相应的角码来表示(表 8-2)。

为了从某一种燃料质的成分、燃烧发热量(Q_u 例外)以及挥发物含量，换算到另一种燃料质的相应数据，可采用表 8-3 中所列的乘数。

表 8-1 燃料的一般分类表

聚集状态	天然燃料	人工燃料 (二次燃料)
固体	木柴及碎木片(“植物燃料”) 泥煤，褐煤，烟煤，无烟煤，可燃页岩(“矿物燃料”)	木炭 焦炭，半焦炭，煤球 煤粉，选煤残余物
液体	石油	石油的提炼产物：汽油，煤油，重油及其它 胶态燃料(重油与煤粉的混合物)，燃料的混合液 固体燃料的氢化产物——“人工液体燃料”
气体	天然气	发生炉煤气；水煤气，空气煤气 ^① 。干馏燃料所生的煤气；照明用煤气，焦炉煤气，石油煤气。工业企业的副产气体：高炉煤气及其它等。气化地下燃料所获得的煤气

① 只送空气至红热的炭层上所产生出来的发生炉煤气称为空气煤气。——译者

燃料的几种折算特性如下：

$$\text{折算水分} \quad W_{np} = 1000 \frac{W^p}{Q_u^p}.$$

$$\text{折算灰分} \quad A_{np} = 1000 \frac{A^p}{Q_u^p}.$$

$$\text{折算杂质含量} \quad B_{np} = 1000 \frac{W^p + A^p}{Q_u^p}.$$

燃料的折算特性表示，在燃料燃烧所放出的每同一数量的能量(即1000大卡)中，所含水分、灰分或二者之和(称为杂质)的数量。

表 8-2 各种燃料质及其元素成分

角 碼	碳	氢	氧	氮	有机硫	黄铁矿硫	杂 质 B	
	C	H	O	N	S _{op}	S _K	灰分 A	水分 W
o	有 机 质 ^①							
i	可 燃 质							
c	干 燥 质							
p	工 作 质							

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_{op}^o = 100\%$$

$$C^i + H^i + O^i + N^i + S_{op}^i + S_K^i = 100\%$$

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S_{op}^c + S_K^c + A^c = 100\%$$

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{op}^p + S_K^p + A^p + W^p = 100\%$$

① 更确切地讲, 有机质是指燃料除去了它的水分和矿物质部分 (100 - W - M) 之后的质量; 可燃质与有机质的区别, 除了有机质中不包含黄铁矿硫 S_K 以外, 还可由燃料烧完后的灰量与燃料矿物质含量 M 之差来确定 (参阅第 7 页)。

表 8-3 换算燃料指标用的乘数

原来的燃料质	换算到下列燃料质时所用的乘数:				
	工 作 质	分 析 质	干 燥 质	可 燃 质	有 机 质
工 作 质	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - M^p}$
分 析 质 (参阅第41页)	$\frac{100 - W^p}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - W^a - A^a}$	$\frac{100}{100 - W^a - M^a}$
干 燥 质	$\frac{100 - W^p}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$	$\frac{100}{100 - M^c}$
可 燃 质	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - W^a - A^a}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1	$\frac{100 - A^c}{100 - M^c}$
有 机 质	$\frac{100 - W^p - M^p}{100}$	$\frac{100 - W^a - M^a}{100}$	$\frac{100 - M^c}{100}$	$\frac{100 - M^c}{100 - A^c}$	1

燃料的水分或灰分改变时, 采用下列乘数:

$$\frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p}, \frac{100 - A_2^p}{100 - A_1^p}, \frac{100 - B_2}{100 - B_1}$$

注: 1. 如果燃料的矿物性二氧化碳 (CO₂)_M^c (碳酸盐二氧化碳) 含量超过了 2.0% (例如碳酸盐性的页岩就是), 那末当换算燃料指标时, 在上表中所列乘数的数值 A 中, 应当加入矿物性二氧化碳含量, 并引入由于硫酸盐的形成及黄铁矿的氧化而需加进的修正值, 也就是, 此时数值 A 应当用下列算式代替:

$$A + (CO_2)_M - 2.5(S_A - S_c) - 0.375 S_K$$

式中 S_A——以硫酸盐的形式包含在试验室灰分中的硫量;

S_c——硫酸盐硫的含量 (详见第 3 页)。

2. 燃烧发热量 Q_o 及 Q_K 的换算, 可按第 9 页所示的公式进行。

各种苏联燃料的 W_{np} 及 A_{np} 的数值，列在表8-23中。

8-2. 燃料的可燃质

矿物燃料的可燃质成分，与燃料形成的特点及条件有一定的关系，也与燃料的化学年代有一定的关系。这里，所谓燃料的化学年代，是指组成它的那些有机物质的变化深度。

按化学年代来说，在固体矿物燃料中，最年轻的是泥煤，其次是褐煤，再其次是烟煤，最后是无烟煤。这些燃料的特性比较，列在表8-4中。

表 8-4 各种矿物燃料的特性比较

指 标	泥 煤	褐 煤	烟 煤
天然水分，%	86~95	30~60	2~15
焦炭，%	28~35	30~50	60~90
碳，%	50~60	60~75	75~90
植物性残余，%	50及以上	0~10	无
腐植酸，%	50以下	5~80	0~5

固体矿物燃料的地质年代是由碳化过程的开始时间来决定的；它并不总是能与燃料的化学年代相符合。例如，往往遇到从地质年代来说较烟煤为久的褐煤。

燃料可燃质的元素

碳(C)是可燃质的主要元素。无定形碳的燃烧发热量为7854大卡/公斤。含碳量是将燃料试样放在氧气中燃烧，然后再吸收燃烧所形成的 CO_2 ，并称出它的重量从而求得的〔参考文献3〕。

氢(H)是可燃质的第二个重要元素。气体状态的氢的燃烧发热量为34180大卡/公斤。含氢量的测定与含碳量的测定相似；唯一不同之处是被吸收的物质是燃烧所生成的水分〔参考文献3〕。

氮(N)是燃料可燃质中的杂质。燃料燃烧时，氮以游离状态析出。

氧(O)是可燃质中的杂质。氧存在于燃料中，不仅减少了燃料可燃部分的百分数，并且还表明某些可燃部分似乎是处在已经氧化了的形态下。

燃料中C、H、N及O的含量总和，组成了它的所谓标称有机质(不包括有机硫的有机质)。

各种燃料的标称有机质的成分列在表8-5中。

硫(S)以各种不同的可燃性化合物及不可燃性化合物的形式存在于燃料中。硫的燃烧发热量为2220大卡/公斤。

燃料的总含硫量 $S_{\text{总}}$ 是由有机硫 S_{op} 、黄铁矿或硫化铁硫 S_k ，以及硫酸盐硫 S_s 等部分相加而成的。 S_k 主要是以 FeS_2 的形态包括在燃料的矿物质部分内，而 S_s 则是以硫酸盐，如 $CaSO_4$ 及 $FeSO_4$ 的形态，包括在燃料的矿物质部分内的。在燃料的可燃质中，包括所谓可燃硫 S_2 ： $S_2 = S_{op} + S_k$

表 8-5 各种燃料标称有机质的平均成分

燃 料	标称有机质的平均成分(%)				有机质的高位燃烧 发热量(大卡/公斤)
	C	H	O	N	
木 柴	50	6	43	1	4500~4800
腐植形成物:					
泥煤	53~60	6~5.5	39~33	2	5100~5900
褐煤	62~79	6~4	27~17	1.5	6300~7200
年代浅的烟煤	75~83	6~5	9~7	1.7	7500~8300
肥烟煤	83~90	5~4	7~5	1.7	8200~8700
无烟煤	93~97	3~1	3~1	0.8	8050~8350
脂成煤:					
沥青煤	74~77	11~10	14~12	0.3	8600~8800
可燃页岩	60~75	10~8	10~8	0.3~1.2	7000~9000
石 油	85~87	13~11	2~0.5	0.05~0.2	10500~11000

挥发硫 S_v 是总含硫量的一部分。燃料燃烧时,挥发硫变成气态的化合物 SO_2 及 SO_3 。一般将挥发硫当作等于可燃硫,即

$$S_v = S_t = S_{op} + S_K;$$

这是不太准确的,因为当燃料燃烧时,硫酸盐硫在高温条件下也部分地分解,生成 SO_3 。

燃料中的总含硫量可按照苏联国家标准(GOST)6380-52所规定的标准方法测定,而各种不同形式的硫含量则要用某些专门的方法测定[参考文献3]。

硫存在于燃料中,降低了燃料的含碳量及燃烧发热量。硫燃烧时所形成的氧化物(SO_2 及 SO_3)引起锅炉机组金属部分的腐蚀,毒化空气,损伤植物并加速建筑物的损坏。

8-3. 燃料的水分

水分是燃料的有害成分,因为它降低了燃料的热质,它与各种矿物性夹杂物一起,组成了燃料的杂质。

燃料中的水分造成下列不良结果:使燃料的运输费用和装卸费用增加;恶化燃料的可燃性并延缓它的燃烧过程;增大燃料燃烧产物的体积,降低燃烧温度并增加引风机所消耗的能量(这就降低了锅炉机组的效率);恶化固体燃料的流散性或甚至使流散性完全消失,特别是在环境温度低的情况下(引起冻结);在固体燃料储放时,促进燃料的风化和自燃。关于各种苏联燃料的平均含水量的资料,列在表8-20中。

固体燃料停留在空气中时,水分逐渐损失(如系干燥燃料,则取得水分),直到燃料水分的饱和蒸汽压力与空气中的水蒸汽的分压力,即与空气的相对湿度平衡时为止(详见图8-1)。

在自然条件下所含水分保持稳定的固体燃料,称为风干燃料。

各种固体燃料的风干的试验室试样所含的水分,列在表8-6中;风干的分析试样所含的水分数据,列在表8-20中。关于燃料分析试样的制备,可参阅本书8-9节的说明。

燃料的固有水分,是将燃料的分析试样准确保持在下述条件下达到风干状态时,它所含有的水分:环境温度 $20^{\circ}C(\pm 1^{\circ}C)$,空气的相对湿度65%($\pm 5\%$)。

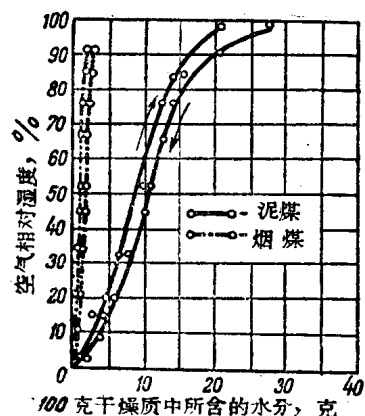


图 8-1 燃料水分与空气相对湿度
度的关系

表 8-6 各种固体燃料的风干的試驗室試样所含的水分

燃 料	水 分 (%)
木柴	8~10
泥煤	9~12
褐煤	8~13
Д 牌烟煤	4~6
Г 牌烟煤	2~5
ПЖ、К、ПС 及 Т 牌烟煤	0.8~1.5
无烟煤	1.5~4.0
爱沙尼亚頁岩	1.0~1.5
伏尔加河頁岩	4.0~6.0

固体燃料中水分的各种形态

吸附水分，是燃料在为水蒸汽所饱和的空气中保持的水分。燃料中吸附水分的含量与它的化学年代有关：化学年代越高，燃料所含的吸附水分越少。

膨胀水分，是燃料的胶质成分所吸收的水分。当膨胀水分失去时，燃料的体积减小，燃料收缩。这种性质只是年代浅的燃料品种，如泥煤及褐煤等才具有。

毛细管水分，充满在燃料的毛细管及细孔中。年代浅的燃料品种(泥煤及褐煤)才具有毛细管及细孔。

机械保持水分，是燃料在浸湿以后燃料块的外表面所保持的水分。

燃料在浸湿(在大量的水自由流动的情况下)以后所能够保持的最多数量的水量，称为燃料的最大容水量(詳見表 8-7)。

表 8-7 煤的最大容水量，%

燃 料	粒 子 大 小 (毫 米)							
	1~2	2~3	3~4	4~6	6~9	9~13	13~18	26~50
莫斯科近郊区褐煤	47.1	40.6	38.6	38.3	36.2	34.7	32.3	32.0
无烟煤	14.0	13.2	11.2	10.8	9.8	8.7	7.2	6.9
頓巴斯 Г 牌烟煤	20.6	—	9.2	—	8.4	6.1	5.6	—

由于燃料块磨碎后它们的单位表面积增大，所以較細的燃料粒子具有較高的容水量。

結晶水包含在燃料的某些矿物性夹杂物(它們是燃料的杂质)的晶体中，如石膏、高岭石等等。

随燃料进入燃烧室的实际水量(以百分数計)，称为燃料的运行水分[参考文献 1]。在具有中間儲仓的开路循环煤粉制备系統中，运行水分 W_{peak} 与工作燃料的水分的差别如下：

$$W_{\text{peak}} = W_0 + n(W^p - W_0), \quad (8-1)$$

式中 W_0 ——儲粉仓中煤粉的水分；

$$n = \frac{B_m}{B} \quad (B_m \text{——該鍋爐機組所用磨煤機的出力};$$

B ——鍋爐機組的燃料耗用量)。

当 $B_m < B$ 时, 即当 $n < 1$ 时, $W_o < W_{pec} < W^p$ 。

当 $B_m > B$ 时, 即当 $n > 1$ 时, $W_{pec} > W^p$ 。

測定燃料水分的标准方法, 在苏联国家标准 6379-52 中已作了規定; 一些其它方法則在[参考文献 3]及[参考文献10]中有說明。

8-4. 燃料的矿物质部分

燃料的矿物质部分, 与水分一样, 属于燃料的杂质。它存在于燃料中, 将引起下述不良結果: 降低燃燒發热量; 使得运输及磨制(固体燃料)費用額外增加; 引起鍋爐的受熱面、飞灰通道及除尘器等的磨損; 使燃燒条件恶化并降低鍋爐機組的运行經濟性(由于引起結焦、燃燒不完全等等), 增多飞灰損失。

人工气体燃料的矿物性夹杂物, 是在該气体的生产过程中落到其中来的外来物质的固体或液体粒子。天然气燃料是不含矿物性夹杂物的。

液体燃料(其中如重油)的矿物性夹杂物, 主要和钻井水有关系。钻井水往往是含有各种盐类的比較濃的溶液。夹杂物也可能由于钻管、油槽、石油貯藏庫等腐蝕的結果而进入重油中, 或在石油产品进行碱处理和酸处理时进入重油中。重油的矿物性夹杂物含量, 一般为0.2~1.0%。

固体燃料的特色, 是它的矿物性夹杂物的含量最多。它的矿物性夹杂物可以按它們的起源性质分成三类: (1)一次的(一次“灰分”), 它包含在燃料所由形成的植物中; (2)二次的(二次“灰分”), 它是在煤层的聚集时期內从外面带入煤层中的; (3)三次的(三次“灰分”), 它是在采矿时从矿頂、矿底及中間层等进入燃料中的。

固体燃料的矿物性夹杂物的主要成分如下: 硅酸盐(SiO_2 , 粘土); 硫化物(主要是 FeS_2); 碳酸盐(CaCO_3 、 MgCO_3 、 FeCO_3); 硫酸盐(CaSO_4 、 MgSO_4); 金属的氧化物及亚氧化物; 磷酸盐; 氯化物; 碱金属盐类。

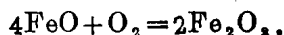
表8-8中列出了某些矿区的燃料的矿物性夹杂物的成分。

表8-8 某些矿区的燃料的矿物性夹杂物的成分

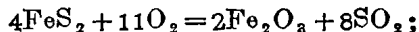
产 地 名 称	燃 料 的 矿 物 质 成 分 (%)		
	粘 土	游 离 SiO_2	FeS_2
莫斯科近郊	65~70	1~1.5	6~19
基捷洛夫	50~64	2.5~6.8	18.5~34
卡拉崗达	45~70	9~32	—
頓巴斯	41~50	16~21	7~12
切里亚宾	42~51	14~21	2.5~17
庫茲聶茨(阿拉里切夫)	50~54	21~26	—

燃料在空气中紅熾时其矿物性夹杂物的轉化

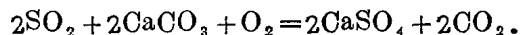
当溫度在400°C以上时, 石膏及硅酸盐失去它們的結晶水; 氧化亚鉄轉化为氧化鉄:



温度在400~600°C的范围内时, 黄铁矿氧化:

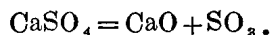


黄铁矿及有机硫氧化时所形成的亚硫酸酐与 CaCO_3 及 O_2 化合:



当温度超过 600°C 时, 各类碳酸盐按下述形式的化学反应进行分解: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, 并且氯化物及碱金属化合物的某些部分也进行挥发。

当温度超过1000°C时, 硫酸盐类分解:



由于化学作用的结果, 燃料燃烧后所生成的灰分的重量和成分, 将不同于燃料原来所含矿物性夹杂物的重量和成分。

灰分是一些不可燃物质的混合物。它们是燃料在全部可燃成分完全燃烧以后, 并且矿物性夹杂物也在空气充分供应的情况下, 由高温作用而完成了全部变化过程以后, 所剩余下来的物质。在表8-9中列出了某些燃料灰分的平均成分。

表 8-9 某些燃料灰分的典型成分, %

燃 料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	碱 (R_2O)
无烟煤	42.5	23.6	25.8	4.8	2.1	1.0	—	—
莫斯科近郊褐煤	37.7	37.8	15.8	4.1	1.5	3.0	—	微量
基捷洛夫煤	44.7	25.1	27.7	1.4	1.3	0.8	—	微量
卡拉岗达煤	58.2	39.1	2.8	微量	微量	微量	—	微量
格多夫斯克页岩	39.3	7.4	6.1	33.3	3.0	7.0	—	3.2
木柴	2.5	4.0	4.0	44.0	9.0	6.0	5.0	20.0

煤及页岩的灰分的测定方法, 规定在苏联国家标准6383-52内; 测定泥煤灰分的方法, 规定在苏联国家标准278-54内; 测定液体燃料灰分的方法, 则规定在苏联国家标准1461-49内。

燃料在燃烧室中燃烧后所形成的灰分, 与燃料在试验室条件下燃烧所形成的灰分 (试验室灰分), 在化学矿物成分上是有所不同的。产生这种差别的原因是:

- 1) 燃烧室的烟气介质在高温情况下所发生的作用;
- 2) 灰分在燃烧室空间中的分开 (分离);
- 3) 燃烧室内衬墙在熔化的灰分中部分溶解;
- 4) 燃料中的矿物质在燃烧室条件下及在试验室条件下所受高温作用的时间不同。

燃料的矿物质按下列公式计算:

$$M = A + W_M + (\text{CO}_2)_M + 0.625S_K - 2.5(S_A - S_c), \quad (8-2)$$

式中 A —— 燃料燃烧时所形成的灰分的数量;

S_A —— 试验室灰分中所含的硫;

W_M —— 硅酸盐中结晶水的含量:

$$W_M = 0.10 \left[A - \text{Fe}_2\text{O}_3 - 1.25S_K - \frac{14}{11} (\text{CO}_2)_M - 2.5(S_A - S_c) - 4.25S_c \right]. \quad (8-3)$$

表 8-10 灰的各种成分的熔点, °C

硅土 SiO_2	1625
矾土 Al_2O_3	2050
石灰 CaO	2570
氧化镁 MgO	2800
四氧化三铁 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{FeO}$	1980
氧化亚铁 FeO	1030
碱类 $\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}(\text{R}_2\text{O})$	800~1000

由于灰分转变成坚固的焦結质或熔化质而在燃烧室内形成的物质, 称为焦渣。灰的各种成分的熔点列在表8-10中。

测定灰分熔化特性的标准方法(苏联国家标准 2057-49), 是把灰的角錐堆放在密闭炉内, 在有一氧化碳存在的半还原气氛中加热。此

时, 确定出下列几个特性温度(詳见图8-2):

t_1 ——开始变形温度, 此时角錐堆开始变弯, 或者角錐堆的尖頂变圆;

t_2 ——軟化温度, 此时角錐堆的頂端弯倒在基础上, 或者角錐堆变成了圓球;

t_3 ——开始成液化状态的溫度, 此时角錐堆的质体流散在底板上。

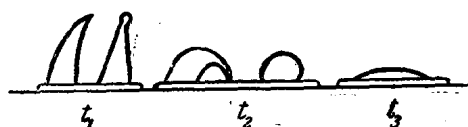


图 8-2 表示灰分熔化性质的三种特性温度的灰角錐堆变化形状

各种燃料的灰分熔化性质的特性温度, 列在表 8-21 中。我們在选定保証鍋炉机组的无結焦运行方式的条件时, 要遵循这些特性温度。

在組織液态除焦时, 必須知道焦渣的粘度大小。焦渣粘度通常是用苏联地区发电站及綫路改进局(ОПРЭС)所提供的方法测定的。这个方法的依据是, 在高温下卷扭焦渣的圓柱形試样, 测量它的变形速度[参考文献 2]。

焦渣的粘度与它們的矿物成分及化学成分有关, 并且随溫度的升高而减小。氧化鉄、氧化镁、氧化鈣等会降低焦渣的粘度, 而鋁的氧化物則可提高它的粘度。

8-5. 燃燒發热量

燃燒發热量 (“含热量”) 是单位重量(如系气体燃料, 則为单位体积)的燃料在完全燃燒以后所放出来的热量。

燃燒發热量的測定, 是把称好的燃料試样放在充滿氧气的密闭金属容器(即卡洛里測定彈筒, 适用于固体燃料及重质液体燃料, 詳見苏联国家标准 147-54) 内或特殊的卡洛里計(适用于气体燃料及輕质液体燃料)内燃燒, 直接測出它所放出的热量而求得的[参考文献 3]。

彈筒燃燒發热量 Q_0 ——单位重量的燃料在卡洛里測定彈筒內燒尽时所放出的热量, 沒有对它进行由于酸的形成而应作的校正。

高位燃燒發热量 Q_g ——在彈筒燃燒發热量中, 校正了燃料在彈筒內燃燒时生成硫及氮的氧化物而产生的生成热及溶解热(于水), 即

$$Q_g = Q_0 - (22.5S_0 + \alpha Q_0) \text{ 大卡/公斤,} \quad (8-4)$$

式中 22.5——硫的氧化物生成及溶解于水时所放出的热量, 每氧化 1% 数量的硫所放出的大卡数;

S_0 ——氧化了的硫量, 以所試燃料試样的 % 表示(通常 $S_0 = S_1$);

α ——系数, 用来計算硝酸形成及溶解于水时的热量。对于貧煤及无烟煤, 此系数为 0.0010, 对于其它煤种及可燃頁岩, 此系数为 0.0015。

在計算頁岩的 Q_b 时，还应考虑碳酸盐分解时所耗的热量：

$$Q_b = Q_g - [22.5S_g + \alpha Q_g + 9.70(CO_2)_M] \text{大卡/公斤},$$

式中 $(CO_2)_M$ ——碳酸盐中的二氧化碳含量，%。

低位燃燒發熱量 Q_u ——等于燃料的高位燃燒發熱量減掉包含在燃料中的以及燃料燃燒时所生成的水分的蒸發熱：

$$Q_u = Q_g - 6(9H + W) \text{大卡/公斤}, \quad (8-5)$$

式中 6——蒸發潛熱，每1%(0.01公斤)凝結在彈筒中的水蒸汽所放出的大卡数；

9——把燃料中的氢含量換算成水的系数。

在苏联，采取工作燃料的低位燃燒發熱量 Q_u^p 作为燃料热值的基本指标。

从高位燃燒發熱量換算到低位燃燒發熱量的計算公式如下：

$$Q_u^p = Q_g^p - 6(9H^p + W^p),$$

$$Q_u^c = Q_g^c - 54H^c,$$

$$Q_u^s = Q_g^s - 54H^s.$$

当燃料水分改变时，燃燒發熱量 Q_u^p 按下列公式进行換算：

$$Q_u^p = \frac{1}{100 - W_1^p} [Q_u^p (100 - W_2^p) + 600(W_1^p - W_2^p)]. \quad (8-6)$$

在进行燃料消耗量的各种計算时，尤其是在考虑許多种热值不同的燃料之和时，我們采用一个概念——“标准煤”。通常是把燃燒發熱量为7000大卡/公斤的煤称为标准煤。

为了将所用的煤換算成标准煤以及反算过来，采用一个数值，即卡洛里当量

$$g = \frac{Q_u^p}{7000},$$

式中 Q_u^p ——所用的煤的低位燃燒發熱量。

下面是某几种燃料的卡洛里当量：

焦炭	0.930	谷壳	0.455
焦末	0.790	碎橡树皮	0.160
焦屑	0.700	麦杆或稻草	0.540
亚麻皮	0.550	块状泥煤(平均)	0.420
葵花子壳	0.530	剉采泥煤(平均)	0.380

固体燃料及液体燃料的燃燒發熱量的計算公式

門捷列夫公式：

$$Q_g = 81C + 300H - 26(O - S_a) \text{大卡/公斤}, \quad (8-7)$$

或

$$Q_g^p = 81C^p + 300H^p - 26(O^p - S_a^p) - 6(9H^p - W^p) \text{大卡/公斤}. \quad (8-8)$$

馮得拉切克公式：

$$Q_g = (78.6 + 2.8\sqrt{100 - C^s})C^p + 270(H - 0.1O) + 25S_a \text{大卡/公斤}. \quad (8-9)$$

对于 C^s 为45%到90%的燃料，上式可簡化为：

$$Q_g = (89.1 - 0.061C^s)C + 270(H - 0.1O) + 25S_a \text{大卡/公斤}. \quad (8-10)$$

用上面的公式，特别是用公式(8-9)，在大多数情况下能够得出与卡洛里計所測得的

数值頗为相同的結果。

气体燃料的燃燒發热量(根据气体分析資料)

$$Q_H^p = 30.18\text{CO} + 25.79\text{H}_2 + 85.55\text{CH}_4 + 141.07\text{C}_2\text{H}_4 + 152.26\text{C}_2\text{H}_6 + 205.41\text{C}_3\text{H}_8 + \dots \text{大卡/标准米}^3, \quad (8-11)$$

式中 CO 、 H_2 、 CH_4 ……—燃料中各該气体的以体积計的百分数含量。

因为在未饱和碳氢化合物族(C_mH_n)中, 主要部分通常是乙 烯 C_2H_4 , 所以未饱和碳氢化合物的含量是用乙 烯表示的, 而 Q_H^p 的数值便按乙 烯的 Q_H^p 来計算。

混合燃料的燃燒發热量

1) 两种固体燃料的混合物或某一固体燃料与某一液体燃料的混合物:

$$Q_H^p = p' Q_H^{p'} + (1 - p') Q_H^{p''} \text{ 大卡/公斤}, \quad (8-12)$$

式中 p' ——其中一种燃料所占的重量百分数;

$Q_H^{p'}$ 、 $Q_H^{p''}$ ——組成本混合物的两种燃料的燃燒發热量, 大卡/公斤。

假使混合物是按燃料各組成部分所发出的热量卡路里值来給定的, 那末其中一种燃料的重量百分数按下列公式求出:

$$p' = \frac{q' Q_H^{p'}}{q' Q_H^{p'} + (1 - q') Q_H^{p''}}, \quad (8-13)$$

或

$$p' = \frac{q' Q_H^{p''}}{q' Q_H^{p''} + (1 - q') Q_H^{p'}}, \quad (8-14)$$

式中 q' ——其中某一种燃料按放出热量而論的百分数。

2) 固体或液体燃料与气体燃料的混合物

計算是以 1 公斤固体或液体燃料为基础而进行的, 并将气体燃料折算为固体或液体燃料的数量(以标准米³計):

$$Q_H^p = Q_H^{p'} + n Q_H^{p''} \text{ 大卡/公斤}, \quad (8-15)$$

式中 Q_H^p ——混合物的标称燃燒發热量;

$Q_H^{p'}$ ——固体或液体燃料的燃燒發热量, 大卡/公斤;

$Q_H^{p''}$ ——气体燃料的燃燒發热量, 大卡/标准米³;

n ——每 1 公斤气体燃料折算为固体或液体燃料的数量, 标准米³/公斤。

假使混合物是以每种燃料所放热量的百分数来給定的, 那末

$$n = \frac{1 - q'}{q'} \cdot \frac{Q_H^{p'}}{Q_H^{p''}} \text{ 标准米}^3/\text{公斤}, \quad (8-16)$$

式中 q' ——固体或液体燃料所放热量占混合物总放热量的百分数。

所謂燃料燃燒时的理論温度, 就是燃料在絕热条件下, 当 $\alpha = 1$ 且 $t_s = t_m = 0^\circ\text{C}$ 时, 其完全燃燒产物的温度,

其中 α ——过剩空气系数;

t_s 及 t_m ——各为空气及燃料的温度。

理論燃燒温度按下式計算:

$$t_{sk} = \frac{Q_H^p}{V_{\text{co}}^p}, \quad (8-17)$$

式中 V_{co}^p ——燃燒产物的体积, 标准米³/公斤;

c_0 ——燃烧产物的平均热容，大卡/标准米³·度。

各种燃料的燃烧发热量及理论燃烧温度的平均数值，列在表8-11中。

表 8-11 燃料燃烧发热量的平均值以及根据该值所计算出来的燃料发热能力

燃 料	燃烧发 热量 ^①	理论燃烧 温度(°C)	燃 料	燃烧发 热量 ^①	理论燃烧 温度(°C)
风干木柴	3250	1650	水煤气	2500	2210
风干泥煤	3270	1713	煤气(在压力下气化燃料而产生的)	3610	2130
莫斯科近郊区褐煤	2980	1818	焦炉煤气(从烟煤提炼的)	3780	2090
顿巴斯矿区Ⅱ牌煤	5640	2105	用蒸汽、氧气喷射法制成的煤气	2370	2050
顿巴斯矿区Ⅰ牌煤	6430	2162	焦炉煤气(从页岩提炼的)	3960	2040
顿巴斯矿区无烟煤	6820	2184	天然气	8470	2020
切里亚宾煤	4350	2025	发生炉煤气(从沥青煤制成的)	1440	1750
庫茲聶茨矿区煤(列宁斯克矿井)	6010	2090	混合的发生炉煤气(从贫煤制成的)	1200	1670
基捷洛夫煤	5720	2121	高炉煤气	940	1470
焦炭	6600	2200	在地下使煤气化而产生的煤气	850	1265
重油	9740	2158			

① 对于固体及液体燃料，燃烧发热量以工作质计， Q_H^p 大卡/公斤；

对于气体燃料，则以干燥质计， Q_H^c 大卡/标准米³。

8-6. 固 体 燃 料

燃 料 的 重 度

燃料的真实重度 γ_{ucm} (在燃料体积中采取密实而没有细孔的燃料质体)按下述公式算出：

$$\gamma_{ucm} = \frac{100\gamma_{opz}}{100 - A^c \left(1 - \frac{\gamma_{opz}}{2.9} \right)}, \text{ 吨/米}^3, \quad (8-18)$$

式中 γ_{opz} ——燃料有机质的重度，吨/米³。

对于无烟煤及贫煤，

$$\gamma_{opz} = \frac{100}{0.53C^2 + 5H^2} \text{ 吨/米}^3. \quad (8-19)$$

对于其它各种煤，

$$\gamma_{opz} = \frac{100}{0.334C^2 + 4.25H^2 + 23} \text{ 吨/米}^3. \quad (8-20)$$

除了顿巴斯无烟煤以外，其它所有的煤， γ_{opz} 都可以采用下述的数字，且具有足够的准确度：

$$\gamma_{opz} = 1.44 \text{ 吨/米}^3.$$

燃料外观重度 γ_{kaz} (在燃料体积中采取包括细孔的燃料质体)按下述公式算出：

$$\gamma_{kaz} = \frac{100\gamma_{ucm}}{100 + (\gamma_{ucm} - 1)W_{nped}} \times \frac{100 - W_{nped}}{100 - W^p} \text{ 吨/米}^3, \quad (8-21)$$

式中 W_{nped} ——燃料在水分很充裕的条件下所能吸收的极限水分(各种燃料的 W_{nped} 值，

与表 8-20 所列的各相应 W_{max}^p 之值相同)。

燃料的外观重度 $\gamma_{\text{каж}}$ 的计算值, 列在表 8-21 中。

确定真实重度及外观重度的方法, 在苏联国家标准 2160-49 中作有规定。

堆积重度 $\gamma_{\text{нас}}$, 就是燃料在堆积状态下, 包括细孔及颗粒间的空隙时的重度。堆积重度与燃料的水分、颗粒度组成及燃料的密实度等有关。

原煤当破碎程度为 $R_s = 20 \sim 30\%$ 时,

$$\gamma_{\text{нас}} = 0.63 \gamma_{\text{каж}} \text{ 吨/米}^3. \quad (8-22)$$

对于煤粉:

$$\gamma_{\text{нас}}^n = 0.5 \gamma_{\text{каж}}^n + 0.004 R_s \text{ 吨/米}^3, \quad (8-23)$$

式中所用的煤粉外观重度 $\gamma_{\text{каж}}^n$ 之值为:

$$\gamma_{\text{каж}}^n = \frac{100 - W^p}{100 - W_n} \cdot \gamma_{\text{каж}} \text{ 吨/米}^3. \quad (8-24)$$

燃料的堆积重度 $\gamma_{\text{нас}}$ 的计算值列在表 8-21 中。决定堆积重度的方法则规定在苏联国家标准 1998-43 内。

燃料的热容 c_m 按下述公式决定:

$$c_m = 0.01 [c^c (100 - W^p) + W^p] \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}. \quad (8-25)$$

式中 c^c ——干燥质的热容, 它是由下列公式计算出来的:

$$c^c = 0.01 [c^s A^c + c^s (100 - A^c)] \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}, \quad (8-26)$$

式中 c^s ——灰分的热容, 灰分的热容可由下面的公式算出:

$$c^s = 0.17 + 1.2 \times 10^{-4} t_m \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}; \quad (8-27)$$

c^t ——可燃质的热容, 它可由下面的公式算出:

$$c^t = 0.20 + 9 \times 10^{-6} (13 + V^s) (130 + t_m) \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}; \quad (8-28)$$

式中 t_m ——燃料的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于已冻结的燃料, 公式 (8-25) 应改为下列形式:

$$c_m = 0.01 [c^c (100 - W^p) + W^{s_{cs}} + c^i (W^p - W^{s_{cs}})] \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}, \quad (8-29)$$

式中 $W^{s_{cs}}$ ——无结冰危险的水分含量, % (详见第 15 页);

c^i ——冰的热容, 取作 0.56。

苏联各种主要燃料的平均计算热容, 列在表 8-21 中。

燃料的导热系数随燃料结构的不同而在很大的范围内变化。随着燃料密实度的增大及挥发分的减少, 其导热系数便增大。对于烟煤, $\lambda = 0.16 \sim 0.50$ 大卡/米·时·度; 对于褐煤及木材, $\lambda = 0.025 \sim 0.15$ 大卡/米·时·度。

堆积状态的煤层的导热系数, 约在 0.1 ~ 0.4 大卡/米·时·度的范围内。例如, 莫斯科近郊煤的 $\lambda = 0.3 \sim 0.4$, 也就是比土壤的导热系

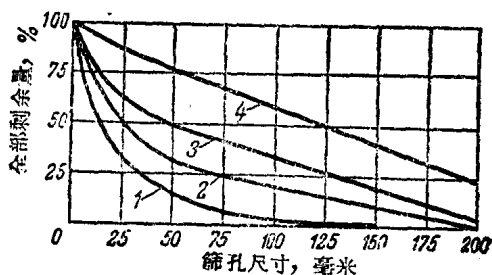


图 8-3 按过筛剩余量表示的几种原褐煤的粒度特性

1—高尔金煤；2—沃尔羌煤；3—4—莫斯科近郊煤。

① W_n 为煤粉水分。——译者