

煤的燃烧 与气化手册

● 李芳芹 等编



化学工业出版社

煤的燃烧与气化手册

李芳芹 等编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

煤的燃烧与气化手册/李芳芹等编写. —北京:化学工业出版社, 1997. 12

ISBN 7-5025-1963-7

I. 煤… II. 李… III. ①煤-燃烧 ②煤气化 IV. TQ534

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 12295 号

煤的燃烧与气化手册

李芳芹 等编

责任编辑:孙绥中 马强

责任校对:蒋 宇

封面设计:郑小红

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印制厂印刷

北京市云浩印制厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 12½ 字数 352 千字
1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

印 数:1—2500

ISBN 7-5025-1963-7/TQ·981

定 价:25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

本手册较全面地汇集了近年来国内外有关煤燃烧和气化工程方面的技术书籍、文献和资料,并结合我国的具体情况编写而成,包括煤的组成及性质;原料煤的储存、输送及制备;煤的燃烧及煤的气化四章。

书中介绍了煤的气化和燃烧过程中对原料煤的要求,所需要各种设备的原理、结构、性能及特点;煤气化及燃烧的方法和发展方向;也介绍了环境保护方面的有关知识和方法等。

参加本书编写的有:李芳芹、陆成辉、陈家仁、刘学智、罗珍宁同志,并由李芳芹同志统一整理全稿。

本手册可供从事煤燃烧与气化工作的管理、规划、科研及设计人员、高校师生和有关外贸人员等参考。

目 录

第一章 煤的组成及性质	1
一、煤的分类	1
1. 中国煤的分类	2
2. 国际分类方案	7
3. 中国煤分类旧方案与各国煤分类方案的对比	9
二、煤的岩相组成和化学结构	12
1. 岩相组成	12
2. 化学结构	14
三、煤质鉴定及各种指标	16
1. 煤样的采制	17
2. 煤质常规鉴定	19
3. 煤的工艺指标	25
四、煤中矿物质的特性	29
1. 煤灰的成分及其微量元素	29
2. 煤灰熔融性	31
3. 煤灰组成与熔点的关系	31
4. 煤灰的结渣性	33
5. 熔渣的粘度	34
6. 熔渣的表面张力	36
7. 熔渣的热扩散性	38
8. 熔渣的电导性	40
第二章 原料煤的储存、输送及制备	51
一、储存	51
1. 流动储存和固定储存	52
2. 开式储存	53
3. 闭式储存	62
4. 料仓储存	64

5. 取料方式	65
二、输送	68
1. 载料能力	69
2. 皮带材质	71
3. 皮带运输机的装料设备	72
4. 皮带运输机跑偏控制和消除	73
5. 动力消耗	75
6. 选型计算	81
7. 其他输送方式及设备	83
三、破碎和磨细	85
1. 煤的可磨性	86
2. 破碎与磨细过程的能耗	87
3. 破碎与磨细设备	89
四、筛分	120
1. 标准筛系列	121
2. 筛分操作类别	121
3. 振动筛应用	125
4. 块煤筛分	126
5. 设备类型、操作原理及其应用	126
五、成型	129
1. 成型原理	129
2. 成型操作	130
3. 影响型块机械强度的因素	131
4. 成型粘结剂	133
5. 成型工艺及设备	134
第三章 煤的燃烧	136
一、煤的燃烧原理	136
1. 燃烧热力学	136
2. 燃烧动力学	139
3. 煤炭燃烧计算	143
二、煤燃烧设备及运行	153
1. 燃烧设备	153
2. 煤的配备与排灰	176

3. 传热问题	177
4. 积灰与腐蚀	181
三、环保技术	188
1. 气体排放物的污染与控制	189
2. 颗粒排放物的污染与控制	195
3. 多环有机物质(POM)污染	199
四、经济评价	200
1. 煤、油、天然气价格比较	201
2. 电厂	201
3. 工业蒸汽的生产	202
五、展望	203
第四章 煤的气化	206
一、煤气化方法	206
1. 煤气化的化学	208
2. 供热问题	210
3. 物理机械因素	210
二、气化炉	214
1. 移动床气化炉	214
2. 流化床气化炉	237
3. 气流床气化炉	258
三、粗煤气的净化和加工处理	283
1. 粗煤气的组成	284
2. 除尘	289
3. 一氧化碳变换	346
4. 酸性气体的脱除	348
5. 甲烷化	365
6. 环境保护	375

第一章 煤的组成及性质

煤炭资源是我国进行社会主义建设的能源基石之一。我国煤炭储量丰富,分布极广,品种齐全。为了合理利用这一宝贵资源,充分发挥其效益,避免使用时造成污染,首先,必须对煤的组成及性质有足够的了解。特别是在进行煤的加工,例如气化、燃烧时,无论是根据煤种来选择工艺方法,还是有了成熟工艺方法来选择煤种,对煤的组成、性质及煤的种种特性的深入了解就更为重要。

因此,本手册首先介绍煤的基础知识。其中包括:煤的分类、岩相组成及化学结构,煤质鉴定及各种指标、煤中矿物质特性等,以满足各方面的需要。

一、煤 的 分 类

煤是由植物形成的。植物质材料在地热和压力作用下,经过漫长的时间逐步形成了煤的沉积物,最后形成了煤。植物的这种变化过程,称为“煤化过程”。植物质材料在煤化过程中变化的程度,称为“变质程度”。不同的煤种的差别,在很大程度上,就在于它们之间的变质程度不同。煤化的第一阶段形成泥炭,然后褐煤,随之次烟煤、烟煤,最后是无烟煤、天然石墨。植物中含 50% 左右的水,干基发热量约为 $18390 \sim 20900 \text{ kJ/kg}$ 。植物的化学组成主要是不同比例的多环高氧有机化合物纤维素和木质素。煤化过程可以认为是氧在形成二氧化碳和水的时候逐渐排出。这样就使残留物中的碳浓度增大。因此,干燥无灰基的氧含量,在植物质中是 30%~50%,到褐煤就逐步减少到 20%~25%,次烟煤是 10%~20%,到烟煤是 5%~10%,而对无烟煤就低到只有 1%。与此同时,无灰基的发热量也由 $9190 \sim 34690 \text{ kJ/kg}$ 变到某些烟煤、无烟煤的 34694 kJ/kg 。由此可见,植物质在形成煤的过程中,由于地质年代、形成的条件及其环境等的不同,可以形成品种纷繁的不同煤种,因

此,煤的分类显然十分重要。

根据煤的不同使用特性进行分类是煤分类的重要原则之一。世界各国根据煤炭资源情况及工业使用要求,分别提出了不同的分类方法。

1. 中国煤的分类

我国煤的分类有新、旧两种方案。目前在使用上正处于交替过程之中。因此,两种方案都做介绍。

(1)旧方案:1956年12月通过,1958年4月正式颁布试行,迄今已近30年了。这种煤分类方案是以炼焦用煤为主来考虑的,主要依据是煤的可燃基挥发分产率(V^t)和胶质层的最大厚度(Y)为参考,将从褐煤到无烟煤之间的各煤种分为10大类,24小类。详见表1-1。

表 1-1 中国煤分类旧方案¹

大类名称	小类名称	分类指标	
		挥发分产率 V^t , %	胶质层最大厚度 Y , mm
无烟煤		0~10	
贫 煤		>10~20	0(粉状)
瘦 煤	1号瘦煤	>14~20	0(成块)~8
	2号瘦煤	>14~20	>8~12
焦 煤	瘦焦煤	>14~13	>12~25
	主焦煤	>18~25	>12~25
	焦瘦煤	>20~25	>8~12
	1号肥焦煤	>26~30	>9~14
	2号肥焦煤	>26~30	>14~25
肥 煤	1号肥煤	>26~37	>25~30
	2号肥煤	>26~37	>30
	1号焦肥煤	≤ 26	>25~30
	2号焦肥煤	≤ 26	>30
	气肥煤	>37	>25

续表

大类名称	小类名称	分类指标	
		挥发分产率 V^i , %	胶质层最大厚度 Y , mm
气 煤	1 号肥气煤	$>30 \sim 37$	$>9 \sim 14$
	2 号肥气煤	$>30 \sim 37$	$>14 \sim 25$
	1 号气煤	>37	$>5 \sim 9$
	2 号气煤	>37	$>9 \sim 14$
	3 号气煤	>37	$>14 \sim 25$
弱粘煤	1 号弱粘煤	$>20 \sim 26$	0(成块) ~ 8
	2 号弱粘煤	$>26 \sim 37$	0(成块) ~ 9
不粘煤		$>20 \sim 37$	0(粉状)
长焰煤		>37	0 ~ 5
褐 煤		>40	—

① 本方案所采用煤样为未受氧化, 并经相对密度为 1.4 浮选液洗选后的精煤。鉴定方法按国家科学技术委员会批准颁布的国家标准进行。

该方案实施多年表明: 这种煤分类方案并不完善。主要表现在: ①胶质层最大厚度(Y)值有时不能确切表示煤的结焦性。因为它主要表明胶质体的数量, 而对胶质体的质量(如: 粘度、稳定性、固化和软化温度等)却反映不足。②对非炼焦用煤划分不细, 有时界线也不够清楚。如: $V^i > 40\%$ 的不粘煤既可划为长焰煤, 亦可划为褐煤。又如: 褐煤与泥煤分界线没有确切规定。无烟煤在品种与应用上差别较大。褐煤亦然, 但该方案没有明确的区分, 等等。

(2) 新方案(GB5751—86): 针对上述问题, 国务院批准了新的煤炭分类标准(即新方案), 于 1936 年 10 月 1 日开始在全国试行。见表 1-2。

新分类从煤的粘结性方面采用了粘结指数为主的指标, 这比原来的胶质层厚度 Y 值更能体现粘结性的本质, 而只是在粘结指数 G 超过 85, 65 等部分情况下, 才采用 Y 值及奥-亚膨胀度 $b\%$ 来作辅助划分指标。另外在褐煤和长焰煤的分类中采用透光率($P_M\%$)和恒湿无灰基高位发热量($Q_{GW}^{A \cdot GN}$)为指标。在无烟煤各小类划分中引入了可燃基氢含

表 1-2 中国煤炭分类总表(1986年10月1日起试行)

类别	代号	数码	分 类 指 标						
			V ^r , %	G	Y, mm	b, %	HP, % ²	P _M , % ¹	Q _{G, W, MJ} kg ^{A, G, N}
无烟煤	WY	01	≤3.5					≤2.0	
		02	>3.5~6.5					>2.0~3.0	
		03	>6.5~10.0					>3.0	
贫 煤	PM	11	>10.0~20.0	≤5					
贫瘦煤	PS	12	>10.0~20.0	>5~20					
瘦 煤	SM	13	>10.0~20.0	>20~50					
		14	>10.0~20.0	>50~65					
焦 煤	JM	15	>10.0~20.0	>65	≤25.0	(≤150)			
		24	>20.0~28.0	>50~65					
		25	>20.0~28.0	>65	≤25.0	(≤150)			
$\frac{1}{3}$ 焦煤	$\frac{1}{3}$ JM	35	>28.0~37.0	>65	≤25.0	(≤220)			
肥 煤	FM	16	>10.0~20.0	>85 ¹	>25.0	(>150)			
		26	>20.0~28.0	>85 ¹	>25.0	(>150)			
		36	>28.0~37.0	>85 ¹	>25.0	(>220)			
气肥煤	QF	46	>37.0	>85 ¹	>25.0	(>220)			
气 煤	QM	34	>28.0~37.0	>50~65					
		43	>37.0	>35~50					
		44	>37.0	>50~65					
		45	>37.0	>65	≤25.0	(≤220)			

续表

类别	代号	数码	分类指标						
			V' , %	G	Y , mm	b , %	H' , % ^{1/3}	P_M , % ^{1/3}	$Q_{d,w}^{A,CN}$, MJ/kg
$\frac{1}{2}$ 中粘煤	$\frac{1}{2}ZN$	23	>20.0~28.0	>30~50					
		33	>28.0~37.0	>30~50					
弱粘煤	RN	22	>20.0~28.0	>5~30					
		32	>28.0~37.0	>5~30					
不粘煤	BN	21	>20.0~28.0	≤ 5					
		31	>28.0~37.0	≤ 5					
长焰煤	CY	41	>37.0	≤ 5				>50	
		42	>37.0	>5~35				≤ 30 >30~50	
褐煤	HM	51	>37.0						≤ 24
		52	>37.0						

① 当 $G > 85$ 时,再用 Y 值(或 b 值)来区分肥煤、气肥煤与其他煤类的界限。当 $Y > 25$ mm 时,如 $V' \leq 37.0\%$,则划分为肥煤,如 $V' > 37.0\%$,则划分为气肥煤,如 $Y \leq 25.0$ mm,则根据其 V' 的大小而划分为相应的其他煤类。当用 b 值来划分肥煤、气肥煤与其他煤类的界限时,如 $V' \leq 28.0\%$,暂定 b 值 $> 150\%$ 的为肥煤,如 $V' > 28.0\%$,则暂定 b 值 $> 220\%$ 的为肥煤或气肥煤($V' > 37\%$ 时)。当按 b 值划分的类别与 Y 值划分的类别有矛盾时,以后者为准。

② 如用 V' 和 H' 划分出的小类有矛盾时,则以 H' 划分的小类为准。在已确定了无烟煤小类的生产厂矿的日常检测中,可以只按 V' 的分类;在煤田地质勘探工作中,对新区确定小类或生产矿、厂需要重新核定小类时,应同时测定 V' 和 H' 值,按规定确定小类。

③ 对 $V' > 37.0\%$, $G \leq 5$ 的煤,再以 P_M 来确定其为长焰煤或褐煤。如 $P_M > 30\% \sim 50\%$,再测 $Q_{d,w}^{A,CN}$,如其值 > 24 MJ/kg 则应划分为长焰煤(地质勘探煤样时,对 $V' > 37.0\%$,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)。

说明:分类用煤样,除 $A^s \leq 10.0\%$ 的采用原煤外,凡 $A^s > 10.0\%$ 的各种煤样,应采用 $ZnCl_2$ 重液选后的浮煤(对易泥化的低煤化度褐煤,可采用灰分尽可能低的原煤样)详见 GB474—83 煤样的制备方法。

量(H')指标,并规定当与 V' 划分发生矛盾时以 H' 为准。新分类方案,从更好地区别煤种特性,方便应用考虑将大类别划分得更细些,增加了贫瘦煤、1/3焦煤、气肥煤和1/2中粘煤等4个大类,从而使原有10大类变成了14大类。

(3)各大类煤的特性及一般用途如下:

a. 无烟煤 是变质程度最深的煤种,含碳量(C_{daf})^①高达90%~98%,可燃基氢含量(H_{daf})都小于4%,化学反应性较低。光泽强,硬度高,纯煤相对密度1.4~1.9。

无烟煤一般用于民用燃料,粮食加工业。目前还大量用于水煤气炉,生产合成氨工业用原料气。某些低灰、低硫的“老年”无烟煤亦可用于碳电极等高级碳素材料的原料。

b. 贫煤 也是变质程度较深的煤种。虽然属于烟煤,但加热时不产生胶质体,燃烧时火焰短,多为动力与民用燃料。

c. 瘦煤 加热时产生的胶质体少且软化温度高。可用作炼焦配煤,以增加焦炭的块度及减少焦炭的裂纹。由于胶质体熔融差,单独成焦的耐磨强度差。

d. 焦煤 受热时产生的胶质体较多且热稳定性好,单煤炼焦可得到强度好、块度大,裂纹少的优质焦炭。但单煤炼焦时膨胀压力大,推焦困难。

e. 肥煤 属中变质程度煤种。加热产生大量胶质体,且其软化温度低,固化温度高。肥煤单独炼焦时可获得熔融良好的焦块,但有较多横裂纹,焦块强度较焦煤焦块略差。一般作炼焦配煤的主要成分。

f. 气煤 有较多的挥发分、焦油。胶质体易热分解,可单独炼焦,尤其是在捣固式焦炉中更好。焦炭细长有纵裂纹,块小,但可增多煤气及副产产量。对城市焦化制气厂是好原料。亦可作为炼制冶金焦的配煤。

g. 弱粘煤 属低中变质程度煤种。加热时产生较少胶质体。焦炭呈小块且易粉碎。主要用做机车、电厂燃料及气化原料。

① 我国煤分析结果以新的符号表示,即以右下角标ar,ad,d,daf代替原右上角标的y,f,g,r,分别表示原应用基、空气干燥基(即分析基)、干基和干燥无灰基(即可燃基)。

h. 不粘煤 是成煤初期曾受相当程度氧化的低、中变质程度的煤种。煤的分析基水分(M_{ad})有时高达 10% 以上,发热量比一般烟煤低,有时还含有较多的次生腐殖酸,一般用于动力及民用,也可作气化用。

i. 长焰煤 是最“年青”的烟煤,不具有粘结性或有极弱的粘结性。它与褐煤之主要区别是在于它不含原生腐殖酸,但其中最“年青”的往往含次生腐殖酸,弱粘结的长焰煤低温干馏时能析出较多的焦油。一般用于动力、气化及民用燃料。在缺乏石油资源时亦可用做低温干馏炼油的原料。

j. 褐煤 多呈褐色,少数呈褐黑色或黑色。水分高、发热量低,含有数量不等的原生腐殖酸,含氧量(O_{daf})高达 15%~30%。褐煤的化学活性强,在空气中易风化碎裂,热稳定性差,受热后严重碎裂。褐煤多作动力、民用燃料,有时亦用作化工原料制取磺化煤、腐殖酸肥料、粘结剂。低灰含氢高的还可以提取褐煤蜡。

2. 国际分类方案

在了解我国煤的分类的基础上,进一步介绍煤的国际分类方案,以便进行煤炭外贸和促进各种用煤工艺进行国际交流。

在国际上,对褐煤以外的硬煤有一硬煤国际分类方案,它是 1953 年提出的,1956 年 3 月作了修订。方案中先用可燃基挥发分将硬煤分为 0~5,6~9 十个类别,其中 $V_{daf} > 33\%$ 的 6~9 类“年青”煤再以恒湿(相对湿度 96%)无灰基的高位发热量[以 $Q_{w(GW)}$ 表示]作为分类指标。在 1 类中又按 V_{daf} 分为 A, B 两个小组。在分成上述 10 个类别之后,再以煤的粘结指数(采用自由膨胀序数和罗加指数均可)划分成 0~3 四个组别。另外再按煤的结焦性指数(用奥-亚膨胀度或葛-金试验焦型)划分成六个亚组(0~5)。国际分类方案中的类别、组别和亚组别均用阿拉伯数字表示,即第一个数字表示煤的类别,第二个数字表示煤的组别,第三个数表示煤的亚组。所以国际分类中任一牌号煤均用一个三位数字表示,只有细分后的 100 号煤和 332 号煤分别以 100A, 100B, 332a 和 332b 表示。具体分类见表 1-3。

硬煤国际分类发表以来,我国一些单位试用结果表明,可以将各国的煤质特征进行对比,亦有利于煤炭国际贸易上统一规格和要求。国内也有

一些焦化厂利用其对烟煤亚组划分较细这一特点,在配煤方案的制定上来作参考。但其划分过细就限制了广泛使用的可能性,有的研究还发现划分组别和亚组别的两对指数间经常出现矛盾,以致两者不能互相取代。

表 1-3 硬煤国

(于 1956 年 3 月在日内瓦国际

组 别(由粘结性确定)			类 型					
组别号	粘结性指数(择任 一种)		第一个数字为类别号(由煤的挥发分 第二个数字为组别号(由煤的粘结性 第三个数字为亚组别号(由煤的结焦					
	自由膨胀序数	罗加指数						
3	>4	>45					435	
						334	434	
						333	433	
						332 a	332 b	432
2	$2\frac{1}{2}\sim 4$	20~45				323	423	
						322	422	
						321	421	
1	1~2	5~20			212	312	412	
					211	311	411	
0	$0\sim \frac{1}{2}$	0~5	000	100 A B		200	300	400
类 别 号			0	1	2	3	4	
确定类别 的指标	挥发分,% [无水无灰基],%		0~3	>3~10 >3 >6.5 ~6.5 ~10		>10 ~14	>14~20	>20 ~28
	发热量,kJ/kg(kcal/kg) (恒湿无灰基,30℃、湿度 96%)							

类别以挥发分指数(煤中挥发分≤33%)或

注:1. 如煤灰分高,实验前用比重液减灰,比重液选能达最高回收率和使煤中灰含量达

2. 332a $V_{daf} 14\% \sim 16\%$; 332b $V_{daf} 16\% \sim 20\%$ 。

3. 中国煤分类旧方案与各国煤分类方案的对比

为便于科研、外贸及生产等方面工作的需要,列出我国旧的煤分类与国际及各国煤分类之对照表(表 1-4),以供参考。

际分类表

煤分类会议中修订)

代 号					亚组别(由结焦性确定)	
或发热量确定) 确定) 性确定)					亚组 别号	确定亚组别的指数(任选一种)
						膨胀性试验 葛-金试验(焦型)
535	635				5	>140 >G ₈
534	634				4	50~140 G ₅ ~G ₈
533	633	733			3	0~50 G ₁ ~G ₄
532	632	732	832		2	≤0 E~G
523	623	723	823		3	0~50 G ₁ ~G ₄
522	622	722	822		2	≤0 E~G
521	621	721	821		1	只收缩 B~D
512	612	712	812		2	≤0 E~G
511	611	711	811		1	只收缩 B~D
500	600	700	800	900	0	无粘结性 A
5	6	7	8	9	各类别煤挥发分大致范围(%) 类别 6: >33~41 7: >33~41 8: 35~50 9: 42~50	
>28 ~33	>33	>33	>33	>33		
--	>32426 (7750)	>30125 ~32426 (>7200 ~7750)	>25522 ~30125 (>6100 ~7200)	>23849 ~25522 (>5700 ~6100)		

发热量指数(煤中挥发分>33%)确定

5%~10%。

表 1-4 中国煤分类(旧)与

中国煤 牌号	国际硬煤分类中 煤的代号	美国煤 牌号	英国煤 代号	法国煤 牌号
长焰煤	800, 900, 700(大部), 600, 611, 711, 811, 812, 712(大部)	次烟煤 (A, B, C) (大部)	802, 902	火焰煤 (大部)
不粘煤	400, 500, 600(大部), 700(部 分)	次烟煤 (B, C)(部 分)	901, 301 (部分)	--
弱粘煤	411, 511, 611, 621, 711, 521, 412, 512, 612, 421, 721(部分), 522, 622, 722, 821, 822(少数)	A 次烟煤 (部分) B 次烟煤 (少数)	801, 701, 300(部分)	火焰煤、 肥焰煤; 1/2 肥煤(少数)
气 煤	532, 632, 533, 633, 623, 733, 732, 822, 723, 823, 722, 832, 721, 712, 534, 634, 622, 621, 612, 611, 711, 811(部分), 521, 512(少数)	高挥发分 煤(A, B, C)	501, 502, 601, 602, 701, 702(大 部)	肥焰煤; 肥煤(部分) 火焰煤(少 数)
肥 煤	435, 535, 635, 434, 534, 634(部 分)	中挥发分 烟煤; 高挥 发分 A 烟煤	401, 402	肥煤; 短 焰肥煤(少 数)
焦 煤	433, 334, 333, 332b, 434, 432, 423, 422(大部), 421, 333, 322(部 分), 412(少数)	中挥发分 烟煤 低挥发分 烟煤	204, 301, 203(部分)	短焰肥煤 1/2 肥煤、 肥煤(少数)
瘦 煤	321, 312, 332a, 212, 211, 322, 323, 311(部分)	低挥发分 烟煤(大部)	200, 203 (少数)	1/4 肥煤 1/2 肥煤 (部分)
贫 煤	200, 300, 211(部分)	半无烟煤 (大部)	201	贫煤(部 分)
无烟煤	000, 100	超无烟煤 半无烟煤 (少数)	100a, 100b	无烟煤 贫煤(部分)