

煤 化 学 基 础

主 编：陈文敏 张自劭
编写人员：陈祚生 陈亚飞 仝锡爱 于 伟
陈文敏 吴春来 李文华 张自劭
戴和武 杨金和 姜 宁

煤 炭 工 业 出 版 社

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书是一本煤化学专业方面的科技读物。它系统地介绍了有关煤的生成、性质、分类和岩相组成等方面的基本知识。阐述了煤的组成、结构、热解机理等煤化学基础理论,也介绍了煤及煤矸石的合理利用与综合利用的加工工艺及其发展趋向,此外,还较全面地论述了煤炭分级和计价方面的知识。

本书可作为培训煤化工专业人员的教材,也可作为从事煤炭开发与利用工作人员的参考材料。

煤 化 学 基 础

主 编: 陈文敏 张自昶

责任编辑: 李 振 祥

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本782×1092mm¹/32 印张11¹/₄

字数254千字 印数1—1,770

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

ISBN 7-5020-0819-5/TD·758

书号 3587 G0260 定价 7.50元

序 言

煤炭是我国主要能源，又是重要的化工原料。我国煤炭资源十分丰富，1990年在我国能源构成中，煤炭所占比重达75.6%。随着煤炭生产的增长和煤炭加工与综合利用的发展，煤炭在我国国民经济发展中所占地位将日益重要。

煤是一种十分复杂的、由有机化合物和无机矿物质组成的混合物。我国煤种繁多，性质各异。煤的性质与煤的合理利用关系十分密切，各种工业用煤对煤炭的质量都有不同要求。只有使用质量合适的煤，才能充分发挥用煤设备的效率，保证产品质量，降低生产成本，使煤得到有效的合理利用。近年来，煤化工日益发展，煤的燃烧技术与化学转化研究不断取得新成果，需要宣传和学习有关煤化学的基本知识和最新的科研成果，以便了解煤炭性质，正确地判断煤炭种类，掌握不同性质煤的各种加工利用的技术要求，进一步开发综合利用煤炭的新途径。

本书主要介绍煤的生成与变质、煤的分类、煤的各种性质、煤炭产品的分级与计价、各种工业用煤的技术要求、煤的加工利用等内容，深入浅出，通俗易懂，并尽可能地采用最新的研究成果。本书既可作为培训煤化学专业人员的教材，亦可作为从事煤炭开发与利用工作人员的参考材料。

汪寅人

1992年12月

目 录

第一章 煤的生成和变质	1
第一节 腐植煤的生成	1
第二节 聚煤条件和我国的主要聚煤时期	13
第三节 煤的变质类型	19
第二章 煤的物理和物理化学性质	30
第一节 煤的表面性质	30
第二节 煤的胶体性质	31
第三节 煤的密度与分子空间结构	37
第四节 煤的机械性质	40
第五节 煤的热性质	46
第六节 煤的电性质和磁性质	52
第七节 煤的光学性质	56
第三章 煤的岩相组成	61
第一节 宏观煤岩组成	61
第二节 煤的显微组成	65
第三节 残植煤、腐泥煤和腐植腐泥煤	84
第四节 煤岩显微组分的性质	88
第五节 煤岩学的应用	93
第四章 煤的热解和结焦特性	97
第一节 煤的热分解	97
第二节 烟煤高温热解	98
第三节 影响高温热解过程的主要因素	102
第四节 烟煤热分解时胶质状态的形成及性质	108

第五节	煤的粘结和成焦	114
第六节	我国炼焦煤的特征及配煤炼焦	118
第七节	煤的高温干馏产物	124
第五章	煤炭的分类与应用	128
第一节	中国煤炭的分类	128
第二节	煤的国际分类	163
第六章	煤的组成结构	183
第一节	煤的组成结构	184
第二节	煤分子中的基本结构单元	191
第三节	煤的结构模型	209
第七章	各种工业用煤的技术要求	219
第一节	炼焦用煤的质量要求	219
第二节	发电用煤的质量要求	224
第三节	气化用煤的质量要求	225
第四节	液化用煤的质量要求	228
第五节	蒸汽机车用煤的质量要求	230
第六节	水泥回转窑用煤的质量要求	230
第七节	高炉喷吹用煤的质量要求	231
第八节	其他工业用煤的质量要求	235
第八章	煤炭产品的分级和计价方法	239
第一节	煤炭产品的分级	239
第二节	煤炭计价的原则和质量指标	244
第三节	煤炭按灰分计价方法	249
第四节	动力煤按发热量计价方法	266
第九章	煤炭资源合理利用和综合利用	280
第一节	煤炭在我国能源中的重要地位	281
第二节	我国煤炭资源分布	282
第三节	煤炭加工	285
第四节	煤炭转化	300

第五节 煤炭综合利用	343
第六节 煤炭资源的合理利用	345
第十章 煤矸石的综合利用	350
第一节 我国煤矸石的主要性质	350
第二节 煤矸石的利用途径	352

第一章 煤的生成和变质

煤是由古植物经过复杂的生物化学、物理化学和地球化学作用转变而成的固体有机可燃矿产。经过煤化学、煤田地质学和煤岩学家们的辛勤劳动，目前由植物→泥炭(腐泥)→褐煤→烟煤→无烟煤的煤化序列的成煤理论已经建立；而且基本搞清了成煤的原始物质、沉积环境、介质的化学作用和变质等各种因素对煤性质的影响。由泥炭(腐泥)到无烟煤的演变过程统称为煤化作用，作用的程度称为煤化程度。这是影响煤性质最主要的一条轴线。下面就煤的生成、变质和各种煤质指标与煤化程度之间以及各煤质指标之间的关系分别进行阐述。

第一节 腐植煤的生成

成煤的原始物质是植物。而植物又可分为低等植物和高等植物两大类。属于低等植物的有菌类和藻类。它们没有根、茎、叶的分化，多数生活在水中，处于浮游状态，顺水漂流，所以又叫浮游生物。高等植物有苔藓、蕨类、裸子植物和被子植物。它们在形体结构和生理特征上都比低等植物复杂。如裸子和被子植物(合称种子植物)就有根、茎、叶、花等器官，并以种子繁殖。由高等植物演变形成的煤叫腐植煤，由低等植物更扩大一点，由浮游生物演变形成的煤叫腐泥煤。如成煤的原始物质中既有高等植物，又有浮游生

物，则形成腐植-腐泥煤或腐泥-腐植煤。世界上储量大、分布广的是腐植煤，在煤的生成方面研究得比较深入的也是腐植煤。所以下面着重讲腐植煤的生成。

随着近代地质学及生物地质学的发展，人们可以在煤层及其附近岩层中发现大量保存完好、可以鉴定属种的古代植物化石；在煤层中可以发现碳化了了的树干；在煤层顶底板的粘土类岩石中可以发现植物根、茎、叶部的印痕和遗迹；如果把煤磨成薄片置于显微镜下观察，还可以看到植物细胞组织的残留痕迹以及孢子、花粉、树脂、角质层等植物残留物。所有这一切，都无可辩驳地证实了腐植煤是由高等植物变来的。

一、地质年代及其成煤概况

地质年代就是地壳发展的时间表。它是通过对地层（某地质年代里形成的岩层就称为该地质年代的地层）生成次序的研究编制而成的。在研究了地层生成的先后次序以后，由老到新排成一个地层系统，最先形成的地层代表的时间最老，最后形成的地层代表的时间最新。

划分地层生成次序的主要依据是古生物化石。随着地壳演变发展，生物的进化总是由简单到复杂，由低级到高级，新生的种类不断地代替着消亡了的旧种类，因而在不同地质年代生成的地层往往含有不同种类的生物化石。也就是说，地层年代是以某些动、植物占优势作为标志来划分的。根据研究，地质年代与生物种类的关系如表1-1所示。

由表1-1可见，地球上陆生植物的出现是距今四亿年前的泥盆纪才开始的，它改变了大陆上荒山秃岭的景象，同时也为煤的生成准备了物质条件。根据生物演化的重要阶段，可以把自寒武纪开始的地球历史划分为三个大时期，分别称为

表 1-1 各地质年代植物生长和造煤情况

代	纪	距今年代 (10 ⁹ a)	植 物 演 进	植物 种类	主要 煤种		
始生代		2003	无化石发现	无生物			
原生代		1453	海藻等演化	藻类植物	石煤		
古 生 代	寒武纪	553	石灰藻及其他藻类繁殖, 无陆生植物				
	奥陶纪	448	石灰藻遍地, 陆生植物仍少见				
	志留纪	381	陆生植物出现, 但不如藻类茂盛	孢子植物	无烟煤 (少量)		
	泥盆纪	354	陆生植物渐盛。有裸蕨类, 石松类				
	石炭纪	309	气候温湿, 裸蕨类、石松类、木贼类等孢子植物繁盛, 形体庞大, 森林茂密	裸子植物	烟煤、 无烟煤		
	二迭纪	223	松、柏、银杏等裸子植物繁盛, 蕨类植物衰落				
中 生 代	三迭纪	185	松、柏、银杏、苏铁等遍及全球, 蕨类植物中石松消灭, 羊齿、木贼等仍有	被子植物	烟煤、 褐煤		
	侏罗纪	157	裸子植物全盛, 苏铁更盛				
	白垩纪	125	被子植物勃兴, 有花植物传播, 如白杨、枫等	被子植物	烟煤、 褐煤		
新 生 代	第三纪		现代五谷、果类甚盛(主要为双子叶和单子叶植物)			子植物	褐煤
	第四纪						褐煤、 泥炭
	现代			泥炭			

古生代、中生代、新生代。与其相应的地层沉积则称为古生界、中生界、新生界。在代以下分为“纪”, 界以下分为“系”。代-纪和界-系的划分标准是国际通用的。

地层和地质年代可以作进一步的细分, 不过比纪和系更

小的单位并不是国际通用的，但它们反映了不同地区的沉积特点，因而也是重要的划分。按顺序，地质年代可以分为代、纪、世、期、时，而地层形成年代相应为界、系、统(群)、阶(组)、段(层)以及化石带。

由表1-1可见，植物的产生和发展与气候及地理环境有密切关系，而气候和地理环境的变化又与地球所接受的太阳辐射热的多少及地壳的变动等因素有关。由于自地球形成以来，地壳已变动了很多次，气候和地理环境也变化了很多次。植物和动物在与气候和地理环境的斗争中并没有绝迹，而是旧种灭亡了，新种产生了，不断地进化为更完善的、更高级的形式：从无生命到有植物细胞出现；从单细胞生物过渡到多细胞藻类；从水生植物到陆生的裸蕨；从孢子植物到裸子植物，再从裸子植物到被子植物，都是植物同气候和地理环境搏斗的结果。这些植物在相应的地质年代中造成了大量的煤，在各个地质年代中，在全球范围内有三个大的主要成煤期，这三个时期是：

(1) 古生代的石炭纪和二迭纪，造煤植物主要是孢子植物，主要煤种为烟煤和无烟煤，但国外也有石炭纪褐煤；

(2) 中生代的三迭纪、侏罗纪和白垩纪，造煤植物主要是裸子植物，主要煤种为烟煤和褐煤，但我国也存在不少侏罗纪形成的无烟煤；

(3) 新生代的第三纪，造煤植物主要是被子植物，主要煤种为褐煤。但我国抚顺矿区为第三纪形成的典型气煤。

二、植物的族组成和菌解作用

(一) 植物的族组成

植物都由细胞构成，细胞由细胞壁和原生质(即内含物)组成。细胞壁的主要组成成分有纤维素、木质素和半纤维

素。原生质由蛋白质、脂肪和碳水化合物组成，也常有叶绿素、树脂等一类物质的混合物。高等植物的表皮部由木栓细胞组成，新的枝芽和所有叶子均为角质所包裹；在叶子表层上有茸毛、厚膜等，它由树脂和树蜡组成；在种子、孢子内含有脂肪。在松树及其它针叶类的木质和树皮中，在特殊的树脂管中含有树脂。高等植物细胞中细胞壁物质比原生质多，植物组织愈简单，其中的细胞原生质愈多。因此，植物的主要族组成有纤维素、木质素、半纤维素、蛋白质、脂肪、树脂、果胶等。

1. 纤维素、半纤维素和果胶

纤维素和半纤维素是多醣，它们都是植物细胞壁的主要组分。果胶是醣的衍生物，主要存在于树木的绿色部分和新生组织的液汁里。纤维素等容易被微生物破坏而形成甲烷、水、二氧化碳等，但也可能经由缩合的途径变成稳定的化合物，甚至芳香化合物。

2. 木质素

木质素也是植物细胞壁的主要成分。木质素的存在，可以增强植物组织的机械强度。目前所指的木质素是指用浓度72%的硫酸或浓度40%~42%的盐酸处理木质时不被水解的物质，其分子具有芳香族化合物结构。木质素是对各种不同生物化学作用都较稳定的物质。

3. 蛋白质

细胞中的原生质主要由蛋白质组成。蛋白质是由许多氨基酸组合而成的，结构很复杂。蛋白质在需氧条件下迅速分解为气态氨，也可能生成氨基酸；在缺氧条件下，主要生成氨基酸。氨基酸和醣类的分解产物通过合成途径，可能形成一种稳定的含氮化合物。

4. 脂肪、树脂和树蜡

高等植物含脂肪很少，只集中在种子、孢子等个别部分，菌类和藻类则含有大量脂肪。高等植物才有树脂，但在健康的植物中含量不大；植物在受伤时，体内即产生大量的树脂，从伤口流出，企图将伤口封住。和脂肪不同，树脂具有芳香族化合物的特性。树脂是高级脂肪酸和一元醇的酯。树蜡多分布在叶子、果皮的表面，以减少水分蒸发。在自然条件下，树脂、树蜡等是对生物化学作用很稳定的物质，而脂肪的分解产物和脂肪酸及一个双键的不饱和脂肪酸也是很稳定的。

综上所述，植物族组成中的纤维素、脂肪、蛋白质等容易腐败分解，而木质素、树脂、树蜡等则对生物化学作用很稳定。在植物转化成煤的过程中，植物的这些族组成可以通过不同的途径参与成煤。其中一些脂肪型的物质在一定的条件下可以形成具有环结构的新物质（如由蛋白质形成的氨基酸、脂肪和醣类转化产物的芳构化和环化等），例如：形成腐殖酸等。

植物的种类不同，其族组成有显著的差别，如表 1-2 所示。高等植物的纤维素（碳水化合物）比低等植物的多，低等植物的木质素少，最低级的菌、藻类植物根本不含木质素，而含蛋白质及树脂类较多。

（二）菌解作用

当植物死亡以后，堆积的环境（如水位、水质等）各不相同，因而植物残骸的腐败分解（即菌解作用）也因之而异。在植物和动物死亡后所形成的有机残骸，视空气中氧进入量的多少，可以发生下列作用。

1. 全败作用

表 1-2 植物的种类及其族组成

植 物		碳水化合物 (%)	木 质 素 (%)	蛋 白 质 (%)	脂 类 (%)
细 菌		12~28	0	50~80	5~20
绿 藻		30~40	0	40~50	10~20
苔 藓		30~50	10	15~20	8~10
蕨 类		50~60	20~30	10~15	3~5
草 类		50~70	20~30	5~10	5~10
松柏及阔叶树		60~70	20~30	1~7	1~3
木 本 不 同 部 分 的 植 物	木质部	60~75	20~30	1	2~3
	叶	65	20	8	5~8
	木 栓	60	10	2	25~30
	孢粉质	5	0	5	90
	原生质	20	0	70	10

全败作用是在空气充足的条件下，植物残骸被完全氧化，分解为二氧化碳和水。此过程不能生成煤，仅留下灰分。

2. 半败作用

半败作用是在空气不充足的条件下，植物残骸发生不完全的氧化分解过程。例如在阔叶树林里堆积起来的潮湿树叶，由于空气进入困难，于是发生不完全的氧化，形成一层黑色的“腐殖土”。这层物质存在的时间不长，或进一步转变而成泥炭，或分解而成二氧化碳和水。

3. 泥炭化作用

这个过程只有在低地沼泽中才能发生。因为在低地沼泽中充满着水，植物（一般都是高等植物）死亡后，就慢慢地堆积在水中，最上面的一层植物因与水面很接近或露出在水面之上，空气仍可进入，但比较困难，因此就发生半败作

用，变成了腐殖土。随着植物的继续死亡和堆积，它们就完全与空气隔绝，氧气停止进入，此时植物残骸就依靠本身所含的氧发生去羧基、脱水等作用，放出二氧化碳、水及甲烷，从而碳含量增加，氢及氧含量则减少。植物残骸经过这些作用后，就部分地改变了原来的形态和结构，变成了一种新的物质，称为泥炭。

4. 腐败作用

腐败作用是指生长在静水湖泊中的微生物（主要是浮游生物）死亡后，在没有空气存在下发生的分解过程。其结果生成一种含碳、氢较原来物质为多，含氧较原来物质少的新的物质，称为腐泥。

上述的植物残骸分解过程归纳如表1-3所示。

表 1-3 植物残骸的分解过程

原始物质	过程名称	与氧的关系	与水的关系	作用的性质	产 物	
陆生植物及 沼泽植物 (高等植物)	全败作用	氧气自由进入	有水分存在	完全氧化	没有固体含碳化合物遗留	
	半败作用	有少量氧进入		腐 殖 化		腐殖土
	泥炭化作用	开始有自由氧进入，后来没有氧气	开始有水分存在，后来沉没水中	开始为腐殖化作用，后来为还原作用	固体含碳化合物	泥炭
水中有有机物 (主要是低等植物)	腐败作用	没有氧气	在死水中	主要为还原作用	固体富氢化合物	腐泥

一般说来，植物残骸的分解有两种典型情况：当植物残骸堆积在地表面时，空气中的氧能进入，则主要发生需氧分解，这种分解与氧化作用相似；当植物残骸浸入水中或埋入

地下(不深)而与空气隔绝时,则主要发生厌氧分解,这种分解与还原作用相似。它们都是生物化学作用。

三、腐植煤的生成过程

高等植物的发生、发展是腐植煤生成的首要条件。煤的大量堆积,需要具备一系列的基本条件,主要是:

(1) 陆地上有均匀的温度和潮湿的气候,适宜于陆生植物一代代地繁茂生长;

(2) 地形的起伏形成大的沼泽地带,有利于植物群的发展及残骸堆积在水中;

(3) 地壳的运动有可能保存植物残骸,并转变到沉积状态。

那么,古代植物是怎样变成煤的呢?根据研究,从植物死亡、堆积到转变成煤,是经过一系列演变过程的,大致可以分为两个阶段:泥炭化阶段和煤化阶段。

(一) 泥炭化阶段

植物能大量繁殖和聚积的地方,有浅海、湖泊和沼泽,尤其是沼泽,它被水充分润湿着,植物的生长十分茂盛。植物不断繁殖、生长、死亡,其残骸堆积在水中之后,在细菌的作用下进行分解;堆积在最上面的一层植物因与水面很接近或冒出水面之上,空气仍可以进入,植物残骸发生不完全的氧化分解;但后来由于植物的继续死亡和堆积,它们完全与空气隔绝,氧气停止进入,这时,植物残骸的菌解作用就依靠本身含有的氧,发生氧化分解,即产生厌氧分解,发生脱羧基、脱水等作用,放出二氧化碳、水及甲烷,形成一种凝胶状物质。这种残留物的碳含量相对增加,而氧和氢含量则趋于减少。植物残骸经过这些变化以后,改变了原来的形状和结构,变成含水分很高的棕褐色物质,这种物质称为

泥炭，或称为泥煤。这个复杂的生物化学变化过程就称为泥炭化过程。

植物残骸如果是在植物生长的地方进行堆积，称为原地堆积；植物残骸从它处迁移而来的堆积，称为迁移堆积；两者兼有的堆积称为原地迁移堆积。堆积条件的不同，将主要影响煤层的规模及煤层含矿物质的情况。

在泥炭化阶段，除去植物残骸中易水解的族组成（如醣类、半纤维素、纤维素和木质素等的深度化学分解）外，分解产物还可以互相发生作用，合成了植物族组成中原来没有的腐殖酸（用碱液处理时能溶解的物质，它是一组组成复杂的有机酸）。腐殖酸是泥炭有机质中的重要组分，是从植物残骸转变为煤的中间产物。泥炭层的分解愈深，腐殖酸的含量便愈多，可达55%~60%，所以腐殖酸的出现和积累是泥炭生成的主要特征。在泥炭化阶段，植物中比较稳定的物质（如树脂、树蜡、角质层、孢子、壳质等）变化很少，这些物质形成了泥炭中的沥青（在常压下能溶于中性有机溶剂的物质），其含量也随泥炭分解程度的加深而增高。此外，腐殖酸、醣类、脂肪等的分解产物也有可能参加沥青的合成。根据原始植物组成的不同，泥炭中沥青的含量变化范围很大，某些泥炭中沥青含量可达20%。

由植物分解后形成的泥炭具有下列特征：含有大量的腐殖酸和沥青；仍含有单醣、半纤维素、纤维素、木质素等植物族组成；同时残留有植物原有的形态部分（如根、茎、树皮等）。

（二）煤化阶段

由于地壳的下沉，泥炭层被埋复于地下，当在泥炭层上面形成了岩石顶板后，即进入了成煤的第二阶段——煤化阶

段。在这一阶段中，根据作用的因素及所发生变化的不同，又可分为成岩作用阶段和变质作用阶段。

1. 成岩作用阶段

如果地壳的下沉速度和植物生长的速度互相配合，将形成很厚的泥炭层，以后就有可能形成很厚的煤层。由于地壳下沉的速度常常超过植物残骸堆积的速度，水层覆盖过厚，影响植物生长，于是泥炭堆积中断，代之以粘土、砂石的堆积，因而在泥炭层上面形成了岩层，称为顶板，被埋覆在顶板下面的泥炭，通常叫埋覆泥炭。此时，如果地壳下沉速度逐渐变慢，又造成了植物生长、繁殖及植物残骸堆积的条件，则泥炭层的顶板仅仅变为泥炭内部的夹石层，以后将形成含有夹矸层的煤层。由上述可见，泥炭层的厚度决定于地壳下沉的速度及植物残骸堆积的速度之间的配合情况，也就是说，原始植物堆积及地壳的运动情况的不同，对生成的煤层的规模、厚度、层数及灰分情况影响较大。

在漫长的地质年代里，埋覆泥炭受着顶板和上覆岩层的压力作用，发生了压紧、失水、胶体老化、硬结等物理和物理化学变化，同时埋覆泥炭的化学组成也发生了相当缓慢的变化，这一切变化使得埋覆泥炭最后变成了密度较大、较致密的黑褐色的褐煤。从无定形的泥炭转变为这种具有岩石特征的过程，称为成岩作用阶段。

一般认为，成岩作用阶段离地表不深，因而温度不是很高，估计低于60~70℃。也就是说，压力和时间因素对泥炭变为褐煤的过程具有特别重要的意义。例如在晚第三纪沉积的煤中，一般只有年轻的褐煤，而在侏罗纪以前的沉积层中，才看到年老的褐煤。

从泥炭过渡到褐煤以后，褐煤中通常不再含有未分解的