



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

Fundamental and Application of Coal to Oil Technologies



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

煤制油技术基础 与应用研究

张德祥 编著

上海科学技术出版社

013042777

TQ52
03



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



煤制油技术基础与应用研究

Fundamental and Application of
Coal to Oil Technologies

张德祥 编著

TQ52
03

上海科学技术出版社



北航

C1650626

777841810 .

图书在版编目(CIP)数据

煤制油技术基础与应用研究/张德祥编著. —上海:
上海科学技术出版社, 2013. 1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1535-9

I. ①煤… II. ①张… III. ①煤液化—研究 IV.
①TQ529

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 296798 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

浙江新华印刷技术有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 35.25 插页: 4

字数: 760 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1535-9/TQ·6

定价: 148.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书启述于煤炭和石油的基础知识,从煤制油的三条途径,即煤热解干馏(快速热解煤焦油)、煤直接加氢液化和煤间接液化[费托(F-T)合成]出发,从原理、研究开发和产业化历程、工艺技术路线、关键设备等方面,阐述了如何从固体煤制备液体燃料,以及煤基粗油的加工精制和应用特性,并概要介绍国内外研发现状与展望。

本书可供煤化工产业和相关政府职能部门的科研工作者、工程技术人员、管理人员参考;也适合高等工科院校化学工程及相近专业的师生和研究人员阅读。

《新能源出版工程》

学术顾问(以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强	朱 军	贡 俊	李 春
张家倍	张德祥	周凤翔	徐洪杰
殷承良	闫耀保	喜文华	董长青
董亲翔	鲍 杰	戴松元	

前 言

中国化石能源资源的特点是富煤、少油、缺气。我国是世界上最大的煤炭生产国,2010年煤炭产量为32.4亿t,占世界的45%。我国以煤为主的能源结构长期存在,2010年能源消费总量为32.5亿t标准煤,其中煤炭占69%,比世界平均水平高出近40个百分点。可以预见在未来30~50年内,煤炭在国民经济发展中将占有不可动摇的主导地位。如此大规模的煤炭开发利用,会造成严峻的生产安全、环境保护、大气污染物与温室气体排放等问题。

随着西部地区煤炭资源的大规模开发,从单纯煤炭输出方式转换到煤、电和煤化工产品(尤其是煤制油产品)同时输出的战略变化,使煤制油技术的春天即将到来。

近年来我国原油和油品进口量增长迅速,2011年原油及成品油进口量突破2.9亿t,花费外汇近2300亿美元,比2010年增加45%,石油进口依存度大于55%。为了保证能源安全,实现经济的可持续发展,充分利用我国丰富的煤炭资源,加快煤热解、煤加氢液化和费托(F-T)合成生产液体燃料的技术开发,是补充国内石油供应和煤炭高效低碳利用的有效途径之一,已得到政府和有关工业部门与科技界的高度重视,并受到人们的广泛关注。正是基于上述状况,特撰写本书。

本书启述于煤炭和石油的基础知识,从煤制油的三条途径,即煤热解干馏(快速热解煤焦油)、煤直接加氢液化和煤间接液化(F-T合成)出发,从原理、研究开发和产业化历程、工艺技术路线、关键设备等方面,阐述了如何从固体煤制备液体燃料,以及煤基粗油的加工精制和应用特性,并概要介绍国内外研发现状与展望。

本书由华东理工大学张德祥教授编著。在本书编著过程中得到许多国内同行的帮助,特别是华东理工大学高晋生教授全力支持,唐初阳、王胜春、任英杰、黄珏、刘鹏、刘铭和田敬宇等同志协助部分文字加工和图表整理工作,同时也得到了“国家重点基础研究发展计划(2011CB201304)”支持,在此表示衷心感谢!

鉴于编者的能力和水平,加上时间仓促,书中可能存在不完善和不妥之处,缺点错误在所难免,恳请同行和读者批评指正,以便进一步修改和完善。

作者

目 录

第 1 章 煤和石油的基础知识 / 1

- 1.1 煤的种类、主要特征与生成 / 1
 - 1.1.1 煤的种类与主要特征 / 1
 - 1.1.2 腐殖煤的种类与主要特征 / 2
 - 1.1.3 煤炭形成 / 5
- 1.2 煤的岩相组成与性质 / 20
 - 1.2.1 宏观煤岩组成 / 20
 - 1.2.2 煤的显微组分 / 21
- 1.3 煤的基本分析指标与分类 / 33
 - 1.3.1 煤的基本分析指标 / 33
 - 1.3.2 煤的分类 / 40
- 1.4 煤的化学结构和若干性质 / 42
 - 1.4.1 主要元素的存在形式 / 42
 - 1.4.2 煤分子结构模型 / 43
 - 1.4.3 煤化学结构的基本概念 / 47
 - 1.4.4 煤的若干物理和物理化学性质 / 54
- 1.5 石油基础知识 / 65
 - 1.5.1 原油的组成 / 66
 - 1.5.2 原油的化学分类和评价 / 70

第 2 章 煤热解制油技术 / 76

- 2.1 煤炭热分解 / 76
 - 2.1.1 煤在加热过程中发生的变化 / 76
 - 2.1.2 煤热解分类 / 77
 - 2.1.3 烟煤在不同温度下热解产物比较 / 77
 - 2.1.4 煤热解产物的影响因素 / 78
- 2.2 煤热解在煤转化中的重要性 / 81
 - 2.2.1 煤热解在煤转化过程中的理论指导意义 / 81

- 2.2.2 煤热解副产物 / 82
- 2.2.3 热解在煤结构与反应性关系研究中的应用 / 82
- 2.3 煤热解的化学反应和影响因素 / 83
 - 2.3.1 煤在热解过程中的宏观变化 / 84
 - 2.3.2 煤在热解过程中的化学反应 / 87
 - 2.3.3 煤热解的影响因素 / 90
- 2.4 煤热解过程自由基演变研究 / 93
 - 2.4.1 煤热解过程自由基含量的变化 / 93
 - 2.4.2 煤热解半焦中自由基浓度与析出物产率的关系 / 95
- 2.5 煤热解过程的动力学研究 / 97
 - 2.5.1 胶质体反应动力学 / 97
 - 2.5.2 脱挥发分动力学 / 99
 - 2.5.3 煤热解动力学模型 / 100
- 2.6 煤的热解机理与模型 / 103
 - 2.6.1 热解机理 / 104
 - 2.6.2 热解模型 / 105
- 2.7 热解工艺 / 109
 - 2.7.1 国外典型工艺 / 109
 - 2.7.2 国内典型热解工艺 / 123
- 2.8 煤热解研究的新进展和动向 / 132
 - 2.8.1 煤加氢热解 / 133
 - 2.8.2 煤与其他物质的共热解 / 139
- 2.9 煤的热解产物 / 143
 - 2.9.1 固体产物 / 143
 - 2.9.2 液体产物 / 145
 - 2.9.3 气体产物 / 145

第3章 煤的直接液化技术 / 147

- 3.1 煤直接液化技术沿革 / 147
 - 3.1.1 煤液化概述 / 147
 - 3.1.2 国外煤直接液化技术沿革 / 148
 - 3.1.3 国内煤直接液化技术开发概况 / 152
- 3.2 煤直接液化化学 / 153
 - 3.2.1 煤加氢液化过程中的化学反应 / 153
 - 3.2.2 煤加氢液化的实验研究方法 / 157

- 3.2.3 煤加氢液化的反应历程 / 159
- 3.2.4 煤加氢液化反应动力学 / 162
- 3.2.5 煤加氢液化的影响因素 / 166
- 3.3 直接液化催化剂 / 184
 - 3.3.1 概述 / 184
 - 3.3.2 煤加氢液化催化剂种类 / 187
 - 3.3.3 催化剂在煤加氢液化中的作用机理 / 197
 - 3.3.4 影响催化剂活性的因素 / 198
 - 3.3.5 液化粗油提质加工催化剂 / 201
 - 3.3.6 催化剂生产 / 203
- 3.4 煤直接加氢液化制油工艺 / 208
 - 3.4.1 煤加氢液化工厂工艺流程简述 / 209
 - 3.4.2 煤直接催化加氢液化工艺 / 215
 - 3.4.3 煤加氢抽提液化工艺 / 224
 - 3.4.4 俄罗斯低压加氢液化工艺流程 / 237
 - 3.4.5 油煤共处理(COP)工艺 / 238
 - 3.4.6 中国神华煤直接液化工艺 / 242
- 3.5 煤直接液化工艺的若干工程问题和关键设备 / 258
 - 3.5.1 煤浆预热器 / 258
 - 3.5.2 油煤浆流变特性的机理分析 / 264
 - 3.5.3 煤液化残渣的流变性 / 281
 - 3.5.4 反应器 / 290
 - 3.5.5 高温气体分离器 / 306
 - 3.5.6 高压低温分离器 / 307
 - 3.5.7 高压换热器 / 307
 - 3.5.8 加氢设备的主要损伤形式 / 309
 - 3.5.9 催化剂 / 310
 - 3.5.10 液化残渣分离和高效利用 / 312
 - 3.5.11 磨损与堵塞 / 315
 - 3.5.12 煤加氢液化的反应热 / 319
 - 3.5.13 氢气的溶解度 / 321
- 3.6 煤直接液化制油的经济性 / 323
 - 3.6.1 煤直接液化的经济分析 / 323
 - 3.6.2 煤直接液化和原油加工项目的经济性对比 / 327
 - 3.6.3 神华示范工程经济测算 / 329

第4章 煤间接液化技术 / 331

- 4.1 合成气的生产 / 331
 - 4.1.1 煤气化制合成气 / 331
 - 4.1.2 由天然气生产合成气 / 348
 - 4.1.3 由焦炉气和炼油厂干气生产合成气 / 352
 - 4.1.4 粗合成气的净化 / 353
- 4.2 煤间接液化的历史与现状 / 358
 - 4.2.1 煤间接液化的历史 / 358
 - 4.2.2 煤间接液化的现状和技术发展 / 361
- 4.3 F-T合成的原理 / 362
 - 4.3.1 F-T合成反应 / 362
 - 4.3.2 F-T合成反应的热力学分析 / 364
 - 4.3.3 反应机理 / 372
 - 4.3.4 产物分布 / 377
 - 4.3.5 F-T合成动力学 / 382
 - 4.3.6 F-T合成的影响因素 / 388
- 4.4 F-T合成催化剂 / 397
 - 4.4.1 催化剂的作用、特性及适用性 / 397
 - 4.4.2 F-T合成催化剂的组成和功能 / 399
 - 4.4.3 F-T合成催化剂的制备 / 402
 - 4.4.4 F-T合成催化剂的失活、中毒和再生 / 404
 - 4.4.5 新催化剂的研究与开发 / 405
- 4.5 F-T合成工艺与产品 / 406
 - 4.5.1 Sasol公司的有关情况 / 406
 - 4.5.2 合成工艺 / 411
- 4.6 F-T合成工程化中的若干问题 / 423
 - 4.6.1 F-T催化合成反应器 / 423
 - 4.6.2 反应器床层温度与热传递 / 428
 - 4.6.3 中国F-T合成油示范装置运行概况 / 432
- 4.7 由CO和H₂合成甲醇和低碳混合醇 / 433
 - 4.7.1 低碳醇的性质和用途 / 433
 - 4.7.2 低碳醇合成的化学原理 / 435
 - 4.7.3 合成低碳醇的催化剂 / 437
 - 4.7.4 合成低碳醇的工艺 / 438
- 4.8 MTG技术 / 440
 - 4.8.1 甲醇转化为烃类的化学原理 / 441

- 4.8.2 催化剂 / 444
- 4.8.3 甲醇制汽油的工艺 / 447

第5章 煤基粗油的加工精制 / 452

- 5.1 煤基粗油的基本特性 / 452
 - 5.1.1 煤热解焦油的特性 / 452
 - 5.1.2 煤直接液化初级产品(液化粗油)的特性 / 460
 - 5.1.3 F-T合成粗油品产物分布及性质 / 467
 - 5.1.4 汽油和柴油指标 / 470
- 5.2 煤基粗油的提质加工化学 / 471
 - 5.2.1 脱杂原子 / 472
 - 5.2.2 烃类的加氢反应 / 475
- 5.3 煤基油的典型加工技术 / 483
 - 5.3.1 煤热解焦油的加工 / 483
 - 5.3.2 煤直接液化粗油的提质加工工艺 / 495
- 5.4 煤基粗油加工的新进展 / 526
 - 5.4.1 煤液化油提取酚类化合物 / 526
 - 5.4.2 中性组分分析与芳香烃分离 / 529
 - 5.4.3 多环芳香烃的催化加氢性能研究 / 534
 - 5.4.4 煤基合成柴油的性质 / 538

主要参考文献 / 541

第 1 章

煤和石油的基础知识

煤是由远古植物的残骸浸入水中,并在生物化学作用下,经过泥炭化阶段,然后被地层覆盖且在地压和温度条件下,经过物理化学与化学作用(又称成岩作用)而形成的有机生物岩,是三维复杂结构的聚合有机质和无机物的复合物。煤生成过程中的成煤植物来源与成煤条件的差异造成了煤种类的多样性与煤基本性质的复杂性,并直接影响煤的开采、洗选和加工利用。

石油是古代生物遗骸经由很复杂的生物和化学作用转化而成的。据估计,大约只有千分之一或更少的生物体,有机会经过很快的掩埋而与氧隔绝以避免腐烂,进而转化成石油的前身——油母质。油母质是一种大分子的有机地质聚合物,以固态存在于页岩或碳酸岩的颗粒间。它的成分很复杂,含碳、氢和少量的氮、硫、氧。形成的油母质在沉积掩埋后,大约经历几千万年,沉积物越埋越深,地温越来越高($100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$),油母质的成熟度达到一定范围(油窗)就转化成液态石油或天然气。石油又称原油,是一种黏稠的、深褐色的液体,主要成分各种烷烃、环烷烃和芳烃的混合物。

1.1 煤的种类、主要特征与生成

1.1.1 煤的种类与主要特征

根据成煤植物种类的不同,煤主要可分为三大类,即腐殖煤、腐泥煤和腐殖腐泥煤。

1.1.1.1 腐殖煤

由高等植物形成的煤称为腐殖煤。腐殖煤因其植物的部分木质纤维组织曾在成煤过程中变成腐殖酸这一中间产物而得名。它在自然界分布最广,储量最大。绝大多数腐殖煤是由植物中的木质素和纤维素等主要组分形成的。亦有少量腐殖煤是由高等植物中经微生物分解后残留的脂类化合物形成的,称为残殖煤。单独成矿的残殖煤很少,多以薄层或透镜状夹在腐殖煤中。我国江西乐平煤田和浙江长广煤田有典型的树皮和角质残殖煤,大同煤田则被发现少量的孢子残殖煤。

1.1.1.2 腐泥煤

由低等植物和少量浮游生物形成的煤称为腐泥煤。腐泥煤包括藻煤和胶泥煤等。藻煤主要由藻类生成,山西浑源有不少藻煤,山东兖州、肥城也有发现;胶泥煤是无结构的腐泥煤,植物成分分解彻底,几乎完全由基质组成。胶泥煤中的矿物质含量大于 40%时又被称为油页岩,我国辽宁抚顺、吉林桦甸、广东茂名和山东黄县等地有丰富的油页岩资源。

1.1.1.3 腐殖腐泥煤

此外,还有腐殖煤和腐泥煤的混合体,有时单独分类成与腐殖煤和腐泥煤并列的第三类煤,称为腐殖腐泥煤。主要有烛煤和煤精:前者与藻煤很相似,宏观上几乎难以区分,易燃(用火柴即可点燃),燃烧时火焰明亮,好像蜡烛一样;煤精盛产于我国抚顺,结构细腻,质轻而有韧性,因能被雕琢成工艺美术品而驰名。

1.1.1.4 煤的主要特征

人们通常讲的煤炭,除非特别指明,基本就是指主要由木质素、纤维素等形成的腐殖煤。腐殖煤与腐泥煤的主要特征见表 1-1。

表 1-1 腐殖煤与腐泥煤的主要特征

特征 \ 煤的种类	腐 殖 煤	腐 泥 煤
颜色	褐色和黑色,多数为黑色	多数为褐色
光泽	光亮者居多	暗
用火柴点燃	不燃烧	燃烧,有沥青气味
氢含量(%)	一般小于 6	一般大于 6
低温干馏焦油产率(%)	一般小于 20	一般大于 25

1.1.2 腐殖煤的种类与主要特征

腐殖煤是近代煤炭综合利用的主要物质基础,也是煤化学的重点研究对象。根据煤化度的不同,它可分为泥炭、褐煤、烟煤和无烟煤四大类。各类煤具有不同的外表特征和特性,其典型的品种一般用肉眼就能区分。

1.1.2.1 泥炭

泥炭是植物向煤转变的过渡产物,外观呈不均匀的棕褐色或黑褐色。它含有大量未分解的植物组织,如根、茎、叶等残留物,有时肉眼就能看出。泥炭含水量很高,一般可达 85%~95%。开采出的泥炭经自然风干后,水分可降至 25%~35%。干泥炭为棕黑色或黑褐色土状碎块。

泥炭的有机质主要包括:

① 腐殖酸。它是泥炭最主要的有机成分,是一种由高分子羟基羧酸组成的复杂混合物,可溶于碱溶液而呈棕红色至棕黑色。当调节溶液的 pH 值达酸性时,则有棕色絮状沉淀析出。

② 沥青质。它指可用苯、甲醇等有机溶剂抽提出的有机物,部分由树脂和树蜡转化而成,部分则由植物组分的还原产物通过合成反应生成。

③ 未分解或尚未完全分解的植物簇组成,包括纤维素、半纤维素、木质素和果胶质等。

④ 变化不大的植物稳定组分,如角质、树脂、孢粉和木栓质等。

泥炭是在沼泽中形成的,根据沼泽的地形、环境、发育阶段的养料供应方式的不同,可将泥炭分为低位沼泽泥炭、中位沼泽泥炭和高位沼泽泥炭三种类型;前两种属土壤营养泥炭,后一种属大气营养泥炭。芬兰学者基维年主张以植物残体对泥炭进行分类,将泥炭分为苔藓泥炭、草本泥炭和木本泥炭;也有人按沼泽的地理位置,将泥炭分为近海沼泽泥炭和内陆沼泽泥炭。

世界上泥炭储量丰富的国家有俄罗斯、芬兰、爱尔兰、瑞典、加拿大和美国等国家。我国的泥炭储量约为 270 亿 t;其中,80%属裸露型,另外 20%属埋藏型。主要分布在大兴安岭、小兴安岭、三江平原、长白山、青藏高原东部以及燕山、太行山等山前洼地和长江冲积平原等地。

泥炭有广泛的用途:经气化可制成气体燃料或工业原料气;经液化可制成人造液体洁净燃料;经干馏所得的泥炭焦是制造优质活性炭的原料;可以气化为合成气,进而生产甲醇等多种化工原料;可以直接制成泥炭纤维板的原料;也可以直接被用做土壤改良剂和高质量的腐殖酸肥料。泥炭的开发和利用已引起国内外的广泛重视,如泥炭腐殖酸被用做花卉和现代农业的基肥,近些年来发展十分迅速。

1.1.2.2 褐煤

褐煤是泥炭沉积后经脱水、压实转变为有机生物岩的初期产物,因外表呈褐色或暗褐色而得名。与泥炭相比,褐煤中腐殖酸的芳香核缩合程度有所增加,含氧官能团有所减少,侧链较短,侧链的数量也较少。由于压力和温度相互作用,腐殖酸开始转变为中性腐殖质。褐煤大多数无光泽,真密度 $1.10 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 。褐煤含水较多,新开采的褐煤其水分达 30%~60%,空气干燥后仍有 10%~30%的水分,易风化破裂。在外观上,褐煤与泥炭的最大区别在于:褐煤不含未分解的植物组织残骸,且在地下是成层分布状态。

根据外表特征,可将褐煤分为土状褐煤、暗褐煤和亮褐煤三种。其中,土状褐煤和暗褐煤属于低煤化度褐煤,亮褐煤属于高煤化度褐煤。此外,还有一种特殊形态的褐煤称为木褐煤。从低煤化度褐煤转变为高煤化度褐煤时,由于其组成与结构的改变,腐殖酸逐渐减少,水分显著降低,颜色变深,光泽从无到有,密度和硬度不断提高。

① 土状褐煤。它是泥炭变成褐煤的最初产物,其断面与一般黏土相似,结构较疏松,易碎成粉末,沾污手指。

② 暗褐煤。它是典型的褐煤,表面呈暗褐色,有一定的硬度,如将其破碎则碎成块状而不形成粉末。

③ 亮褐煤。从外表看,它与低煤化度烟煤无明显区别,因而有些国家称其为次烟煤。但亮褐煤仍含有腐殖酸,外观呈深褐色或黑色,有的带有丝绢状光泽,有的则如烟煤一样

含有暗亮相间的条带。

④ 木褐煤。亦称柴煤,有很明显的木质结构,用显微镜观察可清楚地看到完整的植物细胞组织。它除含有腐殖酸、腐殖质和沥青质外,还含有木质素和纤维素等。显然,木褐煤是由尚未受到充分腐败作用的泥炭所形成的一种特殊形态的褐煤。

德国、澳大利亚等国有丰富的褐煤资源。我国的褐煤资源也较丰富,储量超过 3 000 亿 t,分布在东北、西北、西南和华北等地,主要集中于内蒙古、云南、吉林和黑龙江等地。

褐煤适宜成型作气化原料;其低温干馏的煤气可被用做燃料气或制氢的原料气,低温干馏的煤焦油经加氢处理可制取液体燃料和化工原料;用褐煤半焦或瓷球作热载体对褐煤进行快速热分解是一种低、中温新法干馏工艺,可生产热值为 18.84~20.93 MJ/m³ (标)的优质煤气,焦油产率达 6%~8.5%。褐煤可作为直接加氢液化原料,将其制成油煤浆后催化加氢,褐煤有机质的 80%以上可以转化成气态和液态产物,油收率大于 40%。褐煤经甲苯等溶剂抽提所得的褐煤蜡(又名蒙旦蜡),具有熔点高、化学稳定性好、防水性强、导电性低、耐酸、强度高和表面光亮等特性,是一种优质蜡资源,可被用做表面活性剂、表面光亮剂、疏水剂、色素溶剂和吸油介质等。但褐煤易风化破碎,故一般不宜长途运输。目前,我国的主要褐煤产地多远离城市和大工业用户,因此,褐煤的开发利用是一个迫切需要解决的问题,应予以高度重视。

1.1.2.3 烟煤

烟煤的煤化度低于无烟煤而高于褐煤,因燃烧时烟多而得名。烟煤中已不再含有游离腐殖酸,腐殖酸也已全部转变为更复杂的中性腐殖质了,因此,烟煤不能使酸、碱溶液染色,这是区分烟煤和褐煤的标志之一。一般烟煤具有不同程度的光泽,绝大多数呈明暗交替条带状。所有的烟煤都是比较致密的,真密度较高(1.20~1.45 g/cm³),硬度亦较大。

烟煤是自然界最重要、分布最广、储量最大、品种最多的煤种。根据煤化度的不同,我国将其划分为长焰煤、不黏煤、弱黏煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤和贫煤等。

在烟煤中,气煤、肥煤、焦煤和瘦煤都具有不同程度的黏结性。它们在高温干馏时,能不同程度地“软化”和“熔融”成为塑性体,然后再固化为块状的焦炭。传统观念认为这四种煤是炼焦的主要原料煤,故称之为炼焦煤;除此以外的其他煤没有或基本没有黏结性,只能被用于低温干馏、造气或被用做动力燃料等,故称之为非炼焦用煤。随着煤炼焦工艺的发展,优质炼焦煤资源不足,扩大了炼焦用煤的资源范围。新的炼焦技术已能使用所有的烟煤,甚至是无烟煤作为炼焦配煤的原料成分,而不再仅仅局限于气煤、肥煤、焦煤、瘦煤这四种煤。

1.1.2.4 无烟煤

无烟煤是煤化度最高的一种腐殖煤,因燃烧时无烟而得名。无烟煤外观呈灰黑色,带有金属光泽,无明显条带。在各种煤中,它的挥发分最低,真密度最大(1.35~1.90 g/cm³),硬度最高,燃点高达 360~410 ℃以上。

无烟煤主要被用于民用、发电、燃烧;制作炭电极、电极糊和活性炭等碳素材料的原料以及煤气发生炉造气的燃料。低灰低硫、可磨性好的无烟煤可作新法炼焦的原料、高炉喷

吹和烧结铁矿的燃料以及生产脱氧剂、增碳剂等。

1.1.2.5 腐殖煤的主要特征与区分标志

上述四类腐殖煤的主要特征与区分标志见表 1-2。

表 1-2 四类腐殖煤的主要特征与区分标志

种类 特征与标志	泥 炭	褐 煤	烟 煤	无 烟 煤
颜色	棕褐色	褐色、黑褐色	黑色	灰黑色
光泽	无光泽	大多无光泽	有一定光泽	金属光泽
外观	有原始植物残体,土状	无原始植物残体,无明显条带	呈条带状	无明显条带
在沸腾的 KOH 中	棕红色至棕黑色	褐色	无色	无色
在稀 HNO ₃ 中	棕红色	红色	无色	无色
自然水分	多	较多	较少	少
真密度(g/cm ³)		1.10~1.40	1.20~1.45	1.35~1.90
硬度	很低	低	较高	高
燃烧现象	有烟	有烟	多烟	无烟

1.1.3 煤炭形成

煤炭形成是一个极其漫长与极其复杂的地质过程。煤的成因因素,即成煤植物的种类、植物遗体的堆积环境和堆积方式、泥炭化阶段经受的生物化学作用等影响泥炭形成并保存的诸因素,决定了煤在显微结构上具有多种形态各异的显微成分。煤的变质因素,即泥炭成岩后煤变质作用的类型、温度、压力、时间及其相互作用决定了煤的化学成熟程度,亦即煤化程度,又称煤化度。煤的显微成分组成和煤化度是表征煤的性质,尤其是炼焦用煤的工艺性质、煤热解焦油产率和煤直接加氢液化转化率和油收率。因此,了解煤的生成过程,可以帮助我们从本质上更深刻地认识煤,为煤制油技术选择原料煤。

1.1.3.1 成煤的原始物料

1) 地质年代与主要成煤植物

起初人们对煤是如何形成的认识并不一致,曾提出过多种假说,归纳起来主要有三种:一是认为煤是和地球一起形成的,有地球就有煤;二是认为煤是由岩石变化而来的;三是认为煤是由植物残骸形成的。

随着生产和科学技术的发展,人们在生产实践中常常发现:在煤层中有保存完好的古植物化石和由树干变成的煤,有的甚至保留着原来断裂树干的形状;煤层底板多富含植物根化石或痕木化石,证明它曾经是植物生长的土壤;在显微镜下观察煤制成的薄片,可以直接看到原始植物的木质细胞结构和其他残骸,如孢子、花粉、树脂、角质层和木栓体等;在实验室用树木进行人工煤化试验,可以得到外观和性质与煤类似的人造煤。因此,