

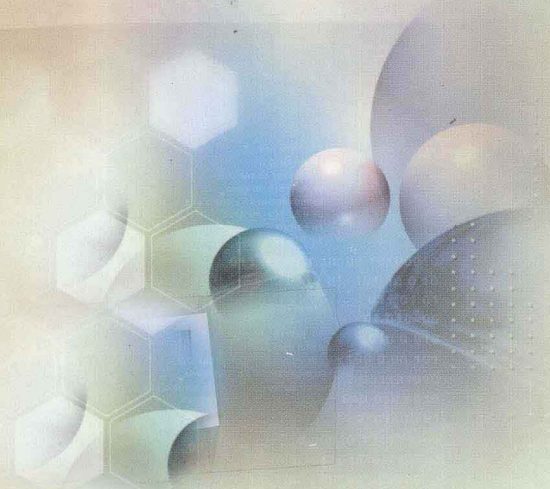


高等学校“十一五”规划教材

洁净煤技术

◎ 周安宁 黄定国 主编

JIEJINGMEI JISHU China University of Mining and Technology Press



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

洁净煤技术

主 编 周安宁 黄定国
副主编 焦红光 赵世永 石常省

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书为高等学校“十一五”规划教材,系统阐述了洁净技术领域基本知识、概念和方法。内容包括:洁净煤技术的分类、基本理论与方法;煤的结构与性质;型煤技术;煤炭分选技术及超纯煤;水煤浆技术;煤炭热解技术;煤炭清洁燃烧技术;燃煤烟气净化技术;煤的气化技术;燃料电池与发电新技术;煤的液化技术;煤的非燃料化利用技术;煤共伴生资源综合利用技术;煤层气及 CO₂ 富集利用技术等。

本书既可作为高等学校化工、矿物加工、环境等相关专业师生教学用书,又可作为洁净煤技术领域工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

洁净煤技术/周安宁,黄定国主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0692 - 3

I. ①洁… II. ①周…②黄… III. ①煤—燃烧—净化—技术
IV. ①TK227.1②TQ53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第126129号

书 名 洁净煤技术
主 编 周安宁 黄定国
责任编辑 褚建萍
责任校对 徐 玮
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 19.25 字数 480 千字
版次印次 2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

环境问题、资源问题和能源问题三者相互交织已成为制约世界经济和社会发展的关键因素,其解决的好坏对人类社会有着根本性的影响。随着低碳经济的发展,洁净煤技术在解决好上述问题中发挥着越来越重要的作用,世界各国已将其列为影响国家安全及可持续发展的战略技术领域。

为适应洁净煤技术的迅速发展,煤炭高校“十一五”教材编写委员会决定编写一本既能系统包含洁净技术领域基本知识、概念和方法,同时又能反映该领域最新发展前沿的教材,以适应洁净煤技术高级人才培养的新要求。本教材就是在这一指导思想下,结合编者多年来的科研及教学成果编写而成的。全书共分十四章,分别论述了洁净煤技术的分类、基本理论与方法;煤的结构与性质;型煤技术;煤炭分选技术及超纯煤;水煤浆技术;煤炭热解技术;煤炭清洁燃烧技术;燃煤烟气净化技术;煤的气化技术;燃料电池与发电新技术;煤的液化技术;煤的非燃料化利用技术;煤伴生资源综合利用技术;煤层气及CO₂富集利用技术等。对于已工业化或近期可实现工业化的技术,结合生产实际进行了重点论述。各章附有习题,以帮助学生进一步理解和掌握基本知识。同时,附有部分主要参考文献,以帮助学生进一步了解本领域发展前沿。

全书由周安宁、黄定国担任主编。各章编写分工如下:第一章由西安科技大学周安宁编写;第二章由辽宁工程技术大学马志军编写;第三章和第六章由中国矿业大学(北京)舒新前编写;第四章由河南理工大学焦红光编写;第五章和第十四章由河南理工大学黄定国编写;第七章和第八章由黑龙江科技学院周国江编写;第九章由西安科技大学李建伟编写;第十章由西安科技大学杨来侠和张宏利编写;第十一章由河南理工大学马名杰编写;第十二章由西安科技大学周安宁和河北科技大学石常省编写;第十三章由西安科技大学赵世永编写。

本书的顺利出版得到了西安科技大学、河南理工大学、中国矿业大学出版社等单位的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

本书在编写过程中还引用或参考了国内外许多专家学者的文献、研究成果,在此对文献的作者表示崇高的敬意和衷心的感谢。

由于编者学识、水平有限,不妥或不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者
2010.6

目 录

第一章 绪论	1
第一节 洁净煤技术的概念、分类	1
第二节 洁净煤技术发展趋势	3
思考题	7
第二章 煤的结构与性质	8
第一节 煤有机质大分子结构	8
第二节 煤的性质	11
思考题	15
第三章 型煤技术	16
第一节 型煤及加工技术	16
第二节 型煤生产工艺	21
第三节 型煤的性能和指标测试	24
思考题	26
第四章 煤炭分选技术及超纯煤	27
第一节 概述	27
第二节 跳汰选煤	30
第三节 重介质选煤	34
第四节 浮游选煤	40
第五节 干法及其他选煤方法	46
第六节 超纯煤制备技术	51
第七节 煤炭生物脱硫技术	54
思考题	57
第五章 水煤浆技术	58
第一节 水煤浆的特点及分类	58
第二节 水煤浆使用性能和评价方法	60

第三节	水煤浆制备关键技术	62
第四节	水煤浆制浆工艺及设备	72
思考题	.....	81
第六章	煤炭热解技术	82
第一节	热解技术的发展	82
第二节	煤热解方法的分类及原理	83
第三节	几种常见的热解工艺	87
思考题	.....	95
第七章	煤炭清洁燃烧技术	96
第一节	煤粉燃烧理论	96
第二节	煤粉燃烧技术	101
第三节	流化床燃烧	102
第四节	动力配煤技术	109
第五节	煤炭的燃烧固硫技术	114
思考题	.....	119
第八章	燃煤烟气净化技术	120
第一节	燃煤烟气中主要物质及危害	120
第二节	烟尘颗粒物的脱除工艺及设备	121
第三节	烟气脱硫技术及设备	127
第四节	烟气脱硝技术	139
第五节	燃煤重金属及其他污染元素排放控制技术	143
思考题	.....	147
第九章	煤的气化技术	148
第一节	煤炭气化的基本原理	148
第二节	煤气化方法	155
第三节	煤气的净化和加工	170
思考题	.....	175
第十章	燃料电池与发电新技术	176
第一节	燃料电池	176
第二节	燃煤磁流体发电技术	185
第三节	洁净煤发电新技术	189
思考题	.....	198

第十一章 煤的液化技术	199
第一节 煤液化的基本概念及发展趋势	199
第二节 煤的直接液化技术	201
第三节 煤的间接液化技术	208
第四节 煤制甲醇及其转化技术	212
第五节 煤制二甲醚	215
思考题	216
第十二章 煤的非燃料化利用技术	217
第一节 煤基功能超细粉体材料	217
第二节 煤基聚合物复合材料	220
第三节 煤制活性炭技术	226
第四节 煤基炭素制品	232
第五节 煤基化学品制备技术	237
思考题	244
第十三章 煤共伴生资源综合利用技术	245
第一节 煤系共伴生矿产的综合利用	245
第二节 煤矸石的综合利用	254
第三节 粉煤灰综合利用	262
思考题	270
第十四章 煤层气及 CO₂ 富集利用技术	271
第一节 煤层气的生成与赋存	272
第二节 煤层气的利用	280
第三节 二氧化碳的分离与富集	282
第四节 二氧化碳的储存处理与利用	289
思考题	295
参考文献	296

第一章 绪 论

煤炭是地球上蕴藏最丰富的化石燃料资源,长期以来一直占据着世界一次能源生产和消费领域的重要位置。但煤炭在开采、开发和利用过程中,会对环境造成严重的污染及影响。因此,从社会发展的客观需要出发,迫切要求实现煤的高效、清洁加工和综合利用。

第一节 洁净煤技术的概念、分类

一、洁净煤技术的概念

洁净煤技术(Clean Coal Technology)是煤炭高效和洁净开发、加工、燃烧、转化及污染控制技术的总称。洁净煤(Clean Coal)一词是 20 世纪 80 年代初期为解决美国和加拿大两国边境酸雨问题由谈判的特使 Drew Lewis(美国)和 William Davis(加拿大)提出的。美国基于经济发展与环境保护的需要,于 1985 年率先提出洁净煤技术,并于 1986 年制定了“洁净煤技术示范计划”。继美国之后,日本、德国、澳大利亚、苏联及中国也成立了国家洁净煤技术研究机构,制定了相应计划,如欧盟的“兆卡计划”、日本的“新阳光计划”、中国的《中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展纲要》。

洁净煤技术是以煤炭分选为源头,以煤炭气化为先导,以煤炭高效、洁净燃烧和洁净煤发电为核心的技术体系,其根本目标就是要减少环境污染和提高煤炭利用效率。主要包括煤炭分选、加工(型煤、水煤浆)、转化(煤炭气化、液化、热解)、先进发电技术(常压循环流化床、加压流化床、整体煤气化联合循环)、烟气净化(除尘、脱硫、脱氮)、矿区环境治理与综合利用等技术领域。

洁净煤技术是发展中的新技术,世界各国依据其经济社会及技术发展的实际情况,分别制定了各具特色的洁净煤技术发展目标。进入 21 世纪,美国又推出了“前景 21(Vision 21)计划”,其目标是促进煤炭的高效洁净综合利用技术的发展,最终实现含碳能源,尤其是煤炭近零排放利用系统。日本也进一步推出了“21 世纪煤炭技术战略”,计划在 2030 年前实现煤作为燃料的完全洁净化。我国从 20 世纪 90 年代初提出发展洁净煤技术以来,陆续出台了一系列促进洁净煤技术发展的法规和政策,已有不少技术得到产业化应用。结合中国实际情况,发展洁净煤技术的主要目标有:一是全过程减排污染物,重点是减排 SO_2 、总悬浮颗粒物(TSP)及 NO_x ;二是提高煤炭利用效率,节约煤炭,减排 CO_2 ;三是强化煤炭转化,改善能源终端消费结构,实现煤炭低碳化利用,促进能源安全问题的解决。洁净煤技术也是目前发展低碳经济及低碳能源的关键技术。

二、洁净煤技术的分类及内容

表 1-1 为广泛认同的洁净煤技术分类。洁净煤技术包括了在煤炭开发使用过程中各个环节的净化和防治技术,是当前世界各国解决环境问题的主导技术之一,也是国际竞争的一

个重要高技术领域。

表 1-1 洁净煤技术的分类

洁净煤技术分类	技术项目
煤炭燃烧前净化技术	选煤、型煤、水煤浆
煤炭燃烧中净化技术	低污染燃烧、燃烧中固硫、流化床燃烧、涡流燃烧
煤炭燃烧后净化技术	烟气净化、灰渣处理、粉煤灰利用
煤炭转化	煤气联合循环发电、煤气化、煤的地下气化、煤的直接液化、煤的间接液化、燃料电池、磁流体发电
煤系共生资源利用	煤层气资源开发利用、煤系有益矿产的利用、煤层伴生水(矿井水)利用

选煤技术是运用物理、化学或微生物学等方法把原煤脱灰、降硫并加工成质量均匀、用途不同的各种商品煤的煤炭加工技术,其目标产品主要为洁净动力商品煤、化肥工业用商品煤、其他工业或民用商品煤等。

型煤技术是将粉煤或低品位煤加工制成具有一定强度和形状的类型煤制品的煤炭加工技术。型煤与常规商品煤相比,煤的利用性质得到了有效改善,燃烧效率得到提高、污染物排放量降低,是一种清洁、高效的工业原料或燃料用商品煤。

水煤浆技术是将煤磨成 250~300 μm 的微细煤粉,然后与水按一定比例配制成的一种新型浆态燃料的煤炭加工技术,水煤浆可像油一样运输、贮存和燃烧。由于水煤浆的火焰中心温度比原煤和油低,故 NO_x 生成量少,而且 SO₂ 和烟尘量远比原煤低。

动力配煤技术是将不同类别和性质的煤经过筛选、破碎和按比例配合等过程,改变动力煤的化学组成、物理特性和燃烧特性,使之达到煤质互补、优化产品结构、满足用户燃烧设备对煤质的要求、提高燃煤效率和减少污染物排放目的的煤炭加工技术。这一技术易于大批量加工,大区域推广,是适合煤炭产、运、供、用现状的洁净煤技术。

煤炭气化技术是煤中有机质在气化炉内先发生热解,热解半焦再与水蒸气、CO₂、H₂ 等气化剂反应被转化成由 H₂、CO、CO₂、CH₄ 及少量含氮、含硫有害气体所组成的气体混合物的煤炭加工技术。在煤气化过程中,煤中矿物质经热解、氧化作用转变为灰渣。混合煤气在使用前可经过后处理技术脱除其中的有害气体。煤气化工艺一般可脱除 99% 的硫分。煤炭经过气化可获得清洁的燃料气、合成气(CO+H₂)、氢气等产品。

煤炭液化技术包括煤的间接液化和直接液化技术。煤的间接液化技术是指在一定反应条件下(如催化剂、温度、压力等)以煤炭气化得到的合成气为原料合成液体燃料或化学产品的技术。通过改变反应条件,不仅可制得液体燃料,而且可获得许多重要化工产品,如乙烯、乙醇、甲醇、甲醛、醋酸等。煤的直接液化技术,也称为煤加氢液化技术,是一种将煤在较高温度和压力下与氢反应使其降解和加氢,从而转化为清洁液体油类的先进煤转化技术。这一过程是由煤的热解、脱除杂原子、加氢、结焦等一系列复杂的反应过程组成,其产物极为复杂,进一步经过加氢提质可以得到各种清洁液体燃料或化学品。

煤气化联合循环发电(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)技术是首先将煤气化生产的燃料用于气驱动燃气轮机发电,再用余气加热锅炉生产蒸汽以驱动汽轮机发电的新技术。由于先把煤气化再使煤气除尘、脱硫净化,送去燃气轮机燃烧室燃烧,因此,该技术不仅具有较高的能源转化率,而且具有十分显著的环境效益。

烟道气净化技术是对煤炭燃烧后产生的 SO_2 、 NO_x 和微颗粒物进行控制的技术。先进的烟道气净化工艺可同时脱除 90% 以上的 SO_2 和 NO_x 。烟气脱硫方法主要有湿法烟气脱硫和干法烟气脱硫。

中国煤层气资源总量为 $2.5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ Gm}^3$ ，是一种宝贵的洁净能源。煤层气中甲烷（在煤矿生产中俗称瓦斯）约占 90% 甚至更多，经常与矿井灾害相联系。因此，煤层气的加工利用对于提高能源利用率、保护环境、减少矿井火灾有着极为重要的意义。

第二节 洁净煤技术发展趋势

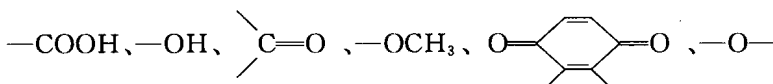
一、基于煤特殊的化学结构发展现代洁净煤技术

煤的化学结构单元是以芳环、氢化芳环、脂环和杂环为核心，周围带有烷基侧链和极性官能团的缩合芳香体系。基本结构单元相互桥连，在二维方向上结成平面网络。氢键缔合、范德瓦耳斯力、偶极作用力及共价键，使得芳香层网相互叠置，在三维空间上生长发育。随着煤级的增加，脂环的热解和减少，缩合芳香体系的芳构化和缩合程度不断增高，芳香层的定向性和有序化程度明显增强，芳香层叠置、集聚形成更大的芳环叠片，孔结构分布由大孔向中孔、微孔方向过渡。煤化学结构的基本结构单元及不同变质程度煤的结构模型如下：

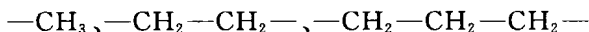
1. 煤的基本结构单元

(1) 基本结构单元的边缘基团

① 含氧官能团

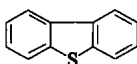


② 烷基侧链




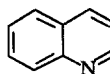
③ 硫、氮杂原子分布

煤中硫原子分布，褐煤以巯基（ $-\text{SH}$ ）、硫醚（ $\text{R}-\text{S}-\text{R}$ ）为主；烟煤以噻吩环如二苯并噻

吩（）为主。

中等变质程度的烟煤中，噻吩硫：芳香硫化物：脂肪硫化物 = 50 : 30 : 20。

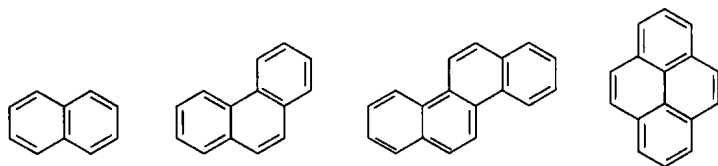
煤中氮原子含量最多，为 1% ~ 2%，其存在形式主要是： $-\text{NH}_2$ ， $-\text{NH}-$ ，吡咯，咪唑，

吡啶（），喹啉（）。

(2) 基本结构单元的主体结构

① 缩合芳香环数

煤的芳香结构单元中，碳原子含量在 70% ~ 80% 之间时，环数为 2；在 83% ~ 90% 之间时，环数为 3 ~ 5；在 95% 以上时，环数激增至 40 个以上。缩合芳环的主要形式如下：



② 芳香度

$f_a = \frac{C_a}{C}$, 其中, f_a 表示芳香度, C_a 为芳香碳原子数, C 为总碳原子总数。

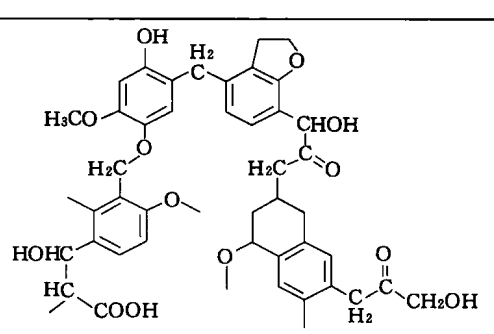
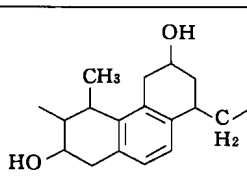
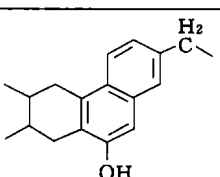
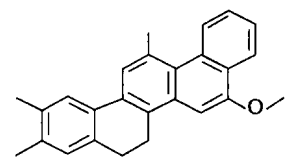
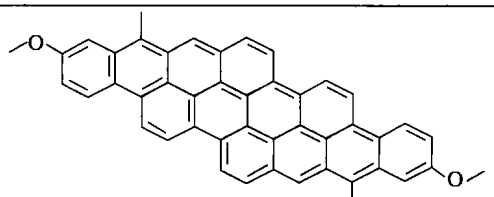
③ 桥键

如次甲基键: $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$; 醚键和硫醚键: $-\text{O}-$ 、 $-\text{S}-$ 、 $-\text{S}-\text{S}-$; 次甲基醚键: $-\text{CH}_2-\text{O}-$ 、 $-\text{CH}_2-\text{S}-$; 芳香碳-碳键等。

2. 不同变质程度煤的结构单元模型

表 1-2 为不同变质程度煤的单元结构模型。煤的特殊结构是煤炭的加工、转化和利用

表 1-2 不同变质程度煤的结构单元模型

煤种	成分特征 / %		结构单元	
	指标	干燥基(d)		干燥无灰基(daf)
褐煤	C H V	64.5 4.3 40.8	76.2 4.9 45.9	
次烟煤	C H V	72.9 5.3 41.5	76.7 5.6 43.6	
高挥发分烟煤	C H V	77.1 5.1 36.5	84.2 5.6 39.9	
低挥发分烟煤	C H V	83.8 4.2 17.5	— — —	
无烟煤				

技术发展的理论基础。煤炭传统利用技术中更多是从煤是一种含碳能源出发,而较少从分子水平上基于煤所具有特殊的组成、官能团结构、缩合芳环结构和杂环结构等特征出发,构建煤炭加工、转化和利用的新技术,这与低碳经济和低碳能源技术的发展需要不相适应。因此,未来洁净煤技术的发展应更多地从煤的大分子结构和组成出发,对煤进行梯级加工、低碳化利用,实现煤在精细化学品、洁净燃料、新材料(碳纳米管、超级活性炭、功能高分子材料等)等方面的梯级多联产转化和利用,延长煤炭利用的生命周期,实现煤炭资源的清洁、高效、可持续发展。

二、洁净煤技术发展的关键技术领域

煤炭开采、加工和转化利用中存在的 key 问题主要包括两方面:一是煤炭在开采中甲烷(又称煤层瓦斯或煤层气)气体的大量排放。甲烷是仅次于二氧化碳占第二位的重要温室气体,但其效能是二氧化碳的数十倍。二是煤炭燃烧及洁净煤转化技术过程中产生大量的二氧化碳,CO₂在大气中滞留的时间超过两百年,对环境的影响在几百年内逐渐显现。因此,煤炭开采过程中低浓度甲烷气体的高效转化与利用、传统洁净煤技术的更新升级、以实现零排放是目前洁净煤技术开发研究的关键。

2002年美国在“洁净煤技术示范计划”基础上提出洁净煤发电计划,其目的是促进低成本、高效、先进的洁净煤技术在美国现有和新建电厂中的商业应用,为未来近零排放能源系统提供技术支持。2003年,美国能源部又进一步提出未来电厂计划,由政府部门与私营机构及国际组织共同投资10亿美元,在5年内完成设计并建造一座零排放的煤基发电厂。未来电厂技术可以使燃煤电厂效率提高到60%或更高,差不多是传统燃煤电厂效率的2倍。

英国的《能源白皮书》明确提出,要把电厂的洁净煤技术作为研究开发的重点。德国在选煤、型煤加工、煤炭气化和循环流化床燃烧技术、煤气化联合循环发电、烟气脱硫技术等方面取得了很大进步。在欧盟的支持下,荷兰和西班牙分别于1994年和1997年建成了两座IGCC电站,示范电站所采用的技术也全部来自欧盟国家。2004年,欧盟在“第六框架计划”中,启动了名为HYPOGEN的计划,其目标是开发以煤气化为基础的发电、制氢、二氧化碳分离和处理的煤基发电系统,实现煤炭发电的近零排放。欧共体国家正在研究开发的项目有煤气化联合循环发电(IGCC)、煤和生物质及废弃物联合气化(或燃烧)、循环流化床燃烧、固体燃料气化与燃料电池联合循环技术等。

日本的洁净煤技术开发从内容上分为两部分:一是提高热效率,降低废气排放。如流化床燃烧、煤气化联合循环发电及煤气化燃料电池联合发电技术等。二是进行煤炭燃烧前后净化,包括燃前处理、燃烧过程中及燃后烟道气的脱硫脱氮、煤炭的有效利用等。日本在2002年的“21世纪煤炭计划”中,提出到2030年前分三个阶段研究开发先进发电、高效燃烧、脱硫脱氮和降低烟尘、利用煤气的燃料电池、煤炭制造二甲醚和甲醇、水煤浆、煤炭液化和煤炭气化等洁净煤技术。2004年日本又在“煤炭清洁能源循环体系”中,提出了以煤炭气化为核心,同时生产电力、氢和液体燃料等多种产品,并对二氧化碳进行分离和封存的煤基能源系统,并在“面向2030年的新日本煤炭政策”中明确将此技术作为未来煤基近零排放的战略技术和实现循环型社会和氢能经济的产业化技术。正在开发的技术包括:提高煤炭利用效率的技术,如IGCC、CFBC和PFBC;脱硫、脱氮技术,如先进的煤炭分选技术、氧燃烧技术、先进的废烟处理技术、先进的焦炭生产技术等;煤炭转化技术,如煤炭直接液化、加氢气化、煤气化联合燃料电池和煤的热解等;粉煤灰的有效利用技术。

在综合国外洁净煤技术发展的基础上,结合中国国情,我国提出了新一代洁净煤技术发展的优先领域(见表 1-3)。另外,二氧化碳减排、富集分离、储存和利用技术也正在成为洁净煤技术和低碳技术发展的重要方向。

表 1-3 中国新一代洁净煤技术优先发展领域

技术领域	过程特点	技术类别	关键技术与优先领域
煤炭深度加工与净化	煤炭利用前	选煤 型煤 配煤 水煤浆	干法选煤技术、浮选柱、惰质组分分离富集方法等;气化型煤、焦化型煤等;劣质煤提质改性、水煤浆技术
煤炭清洁燃烧及先进发电	煤炭燃烧中	循环流化床 超临界气化发电 IGCC	大型化;推广应用;新型高效气化技术
煤炭转化	煤炭利用中	焦化 气化 液化 制氢 煤化工	弱黏结煤大规模焦化试验 低灰熔融性煤的气化技术 提高液体转化率、优化油品组成 提高煤的转化率和氢气产率
煤利用过程中的污染物控制	加工转化中燃烧后控制	废渣、废水和废气治理;烟气后处理	先进的治理与回收技术;节水型高效脱硫、脱硝、脱 VOC 技术;高效除尘装置开发和应用
固体废弃物资源化利用	开采和加工过程及使用后	共伴生矿产综合利用;煤矸石综合利用;灰、渣综合利用	包括煤层气的抽气和综合利用;提取有益矿产、材料化利用;材料回收与加工利用

三、发展洁净煤技术的意义及作用

采用煤炭加工技术,可有效减少原料煤的含灰和含硫量,实现燃烧前脱硫降灰。如采用先进选煤技术可降低原煤灰分 50%~80%,脱除黄铁矿硫 60%~85%,可大量减少煤炭无效运输;电厂和工业锅炉燃用分选煤,可提高热效率 3%~8%;用户燃用固硫型煤,不仅可减少 30%~40%的 SO₂ 排放,减少 70%~90%的烟尘,还可节煤 15%~27%。采用先进的煤炭燃烧技术,可有效提高燃烧效率,实现燃烧中脱硫。采用先进的工业锅炉技术,可提高锅炉热效率 20%以上。采用循环流化床燃烧劣质煤,效率可达 95%以上,炉内脱硫率可达 85%以上。采用煤炭气化和液化等转化技术,可将煤炭转化为清洁的低碳气体和液化燃料,保障国家优质能源的安全使用。采用烟气净化技术可实现燃烧后脱硫,脱硫率达 90%以上。采用矿区生态环境技术,可有效减少煤炭开采带来的矸石和水、气等污染,有效改善矿区环境,实现资源综合利用。

我国资源条件和现有经济条件还不足以支撑大规模利用油和气作为一次能源。发展洁净煤技术,在充分利用我国丰富煤炭资源的前提下,不仅可解决环境污染问题,也可将煤炭转化为清洁的油、气等清洁燃料和化学品,这在相当程度上可以缓解我国石油、天然气供应不足的问题,保障国家的能源安全。发展洁净煤技术对于改善终端能源结构,形成循环经济

的产业链,实现能源、经济、环境的协调发展将起到积极的促进作用。西北地区是中国的重要产煤区,发展洁净煤技术也将有利于西部大开发战略的实施;东南沿海发达地区采用先进的洁净煤技术,可保证清洁能源的安全供应,使经济和环境得到良性发展。中国洁净煤技术立足于本国能源资源特点,贯穿于煤炭开发、加工、转化、终端利用的全过程。发展洁净煤技术,不仅可获得良好的环境效益和社会效益,还可获得显著的宏观经济效益。所以,大力发展循环经济型的洁净煤技术,对保障高效、清洁的能源供应将起到相当重要的作用,是现有经济条件下实现可持续发展的必然选择。

思 考 题

1. 试从环境、社会、循环经济和能源安全等观点出发分析发展洁净煤技术的必要性和重要性。
2. 试比较世界各国洁净煤技术发展的特色和方向,指出我国洁净煤技术发展的优势和特色方向。
3. 从煤分子结构的观点出发,探讨煤梯级多联产利用的方向和技术途径。
4. 分析世界能源消费结构及煤炭开采、加工和利用过程中所产生的主要环境污染物的特征及其趋势。
5. 简要总结低碳能源技术发展的背景及意义。

第二章 煤的结构与性质

煤是由远古植物残骸没入水中经过生物化学作用,然后被地层覆盖并经过物理化学与化学作用而形成的有机生物岩。煤的形成过程涉及极为复杂的物理过程和生物、化学等过程。由于成煤植物种类、成煤时代、成煤过程(包括泥炭化或腐泥化作用、煤化作用等)不同,煤的组成、结构和性质存在着明显差别。煤结构和性质对煤的加工、转化和清洁利用技术的发展起着决定性作用。依据煤岩学的观点,煤的宏观煤岩组成包括镜煤、亮煤、暗煤和丝炭,煤的显微煤岩组成包括有机显微煤岩组分(主要有镜质组、半镜质组、丝质组、半丝质组和壳质组等)和无机显微煤岩组分(主要有黏土类矿物、硫化物类矿物、碳酸盐类矿物、氧化物类矿物和硫酸盐类矿物等)。有机显微煤岩组分是煤的主体,其中镜质组是大多数煤的主要显微组分,是煤炭转化和利用的主体,其主要元素组成为碳、氢、氧、氮和硫等。煤的无机显微煤岩组分在煤转化过程中主要转化为灰分,但在煤转化和利用中也发挥着重要作用,主要元素组成包括硅、钙、铁、铝等,同时还含有大量微量或痕量元素。因此,煤的组成、结构和性质研究是洁净煤技术研究的重要理论基础。关于煤岩结构可以参阅煤化学等相关教材,本章重点讨论煤的结构与性质。

第一节 煤有机质大分子结构

煤的化学结构研究主要是基于煤中的有机显微组分而开展的。由于成煤原始植物组成和成煤过程复杂性极大地影响了煤的结构研究突破,为了更科学地用煤结构理论指导煤炭加工与转化利用技术的发展,人们提出了许多关于煤结构的理论。其中,基于煤的各种结构参数进行推断而建立的平均结构模型得到了大家的普遍认同。目前不同研究者从不同应用背景和不同种类煤的结构参数出发,提出了一系列煤结构模型,其中较有影响的有以下几种。

一、煤的化学结构模型

1. Given 模型

英国 P. H. Given 的煤化学结构模型认为煤的结构单元是 9,10-二氢蒽,主要反映了在年轻的烟煤中没有大的缩合芳香结构(主要是萘环),分子均成线性排列,没有空间结构,有氢键和含氮杂环等的存在,不足之处表现在其没有考虑含硫结构,没有考虑到存在醚键和两个碳原子以上的次甲基桥键。其具体的结构如图 2-1 所示。

2. Wiser 模型

美国 W. H. Wiser 提出的煤化学结构模型被认为是迄今为止比较全面、合理的模型,基本上反映了煤分子结构的大部分现代概念,该模型可以合理解释煤的一些化学反应和性质,如煤的热分解反应和液化性质等。其具体模型如图 2-2 所示。

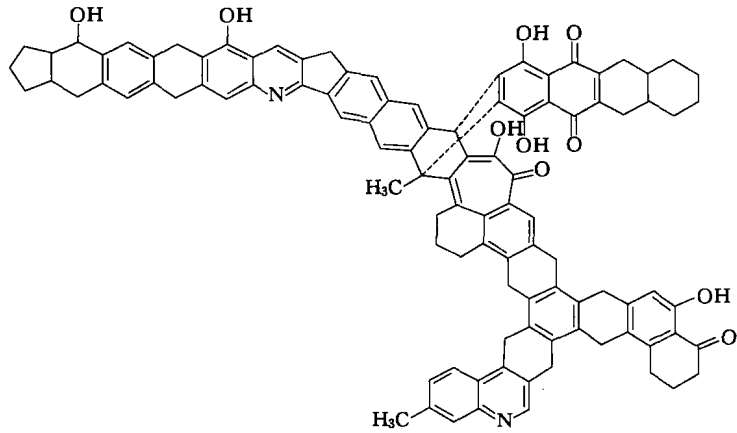


图 2-1 Given 模型

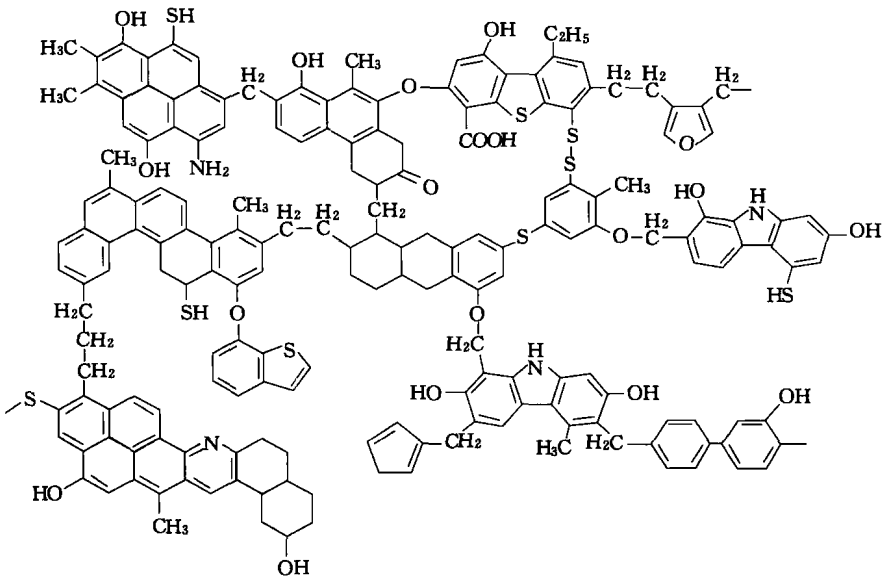


图 2-2 Wiser 模型

3. Shinn 模型

它是 J. H. Shinn 提出的煤化学结构模型,此模型是目前广为人们接受的煤大分子模型,是根据煤在一段和二段液化过程产物的分布提出来的,所以又叫做反应结构模型。与以上几种模型不同,它是以烟煤为对象。此模型不仅考虑了煤分子中杂原子的存在,而且官能团、桥键分布均比较接近实验结果。但是,该模型仍然没有表示出煤中存在的低分子化合物。其具体结构如图 2-3 所示。

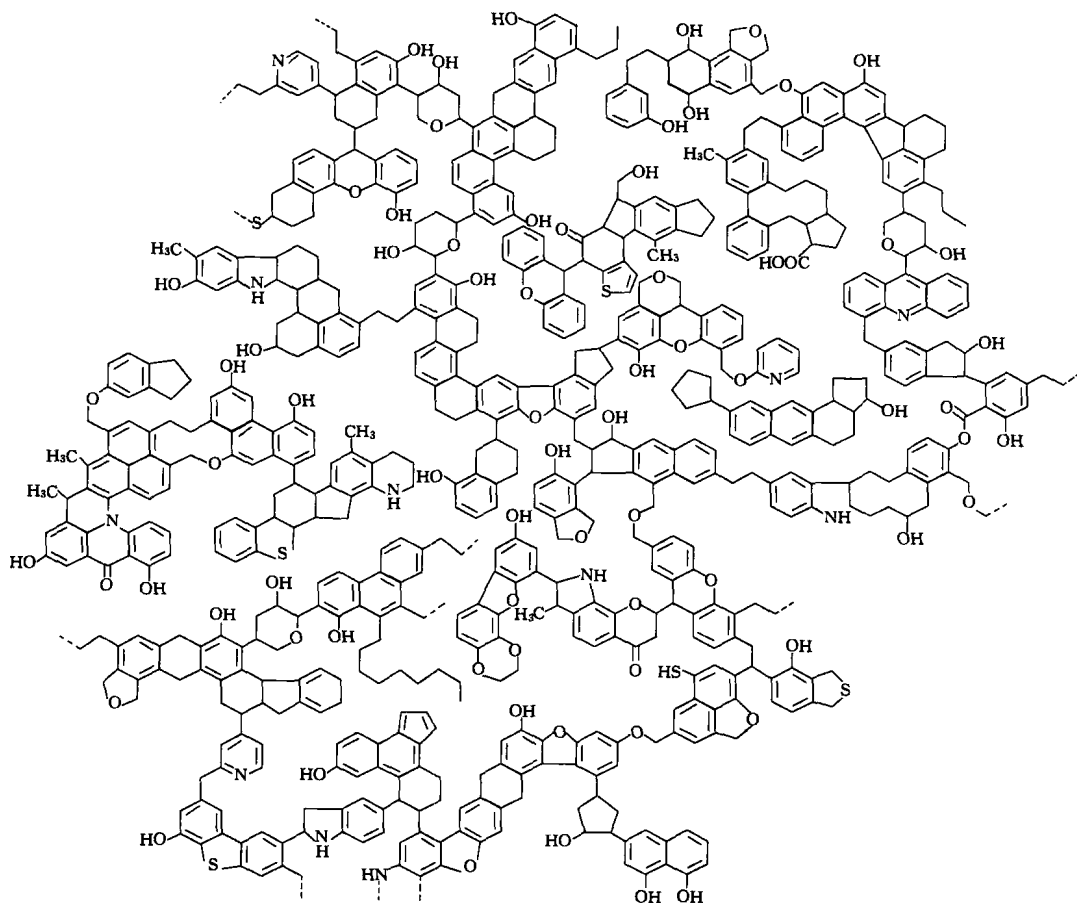


图 2-3 Shinn 模型

二、煤的物理结构模型

1. Hirsch 模型

Hirsch 模型是 Hirsch 于 1954 年利用双晶衍射技术对煤的小角 X 射线漫射进行研究、分析后得出的模型。该模型比较直观地反映了煤化过程中的物理结构变化,具有较广泛的代表性。其模型如图 2-4 所示。

图 2-4 中(a)代表敞开式结构,属于低煤化程度烟煤,其特征是芳香层片较小、不规则的无定形结构比例较大;(b)代表液体结构,属于中等煤化程度烟煤,其特征是芳香层片在一定程度上定向,并形成包含两个或两个以上层片的微晶;(c)代表无烟煤结构,其特征是芳香层片增大、定向程度增大。

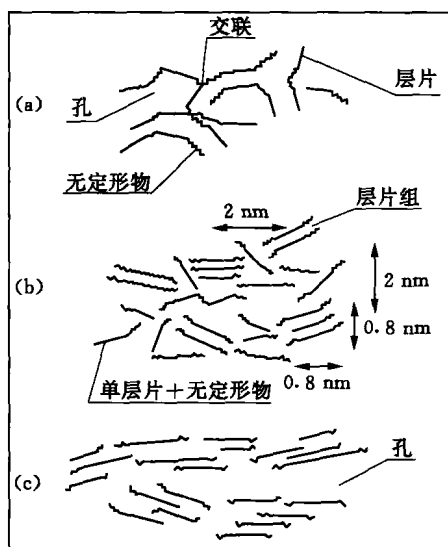


图 2-4 Hirsch 模型