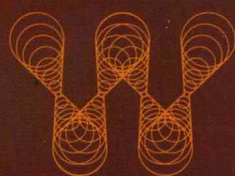


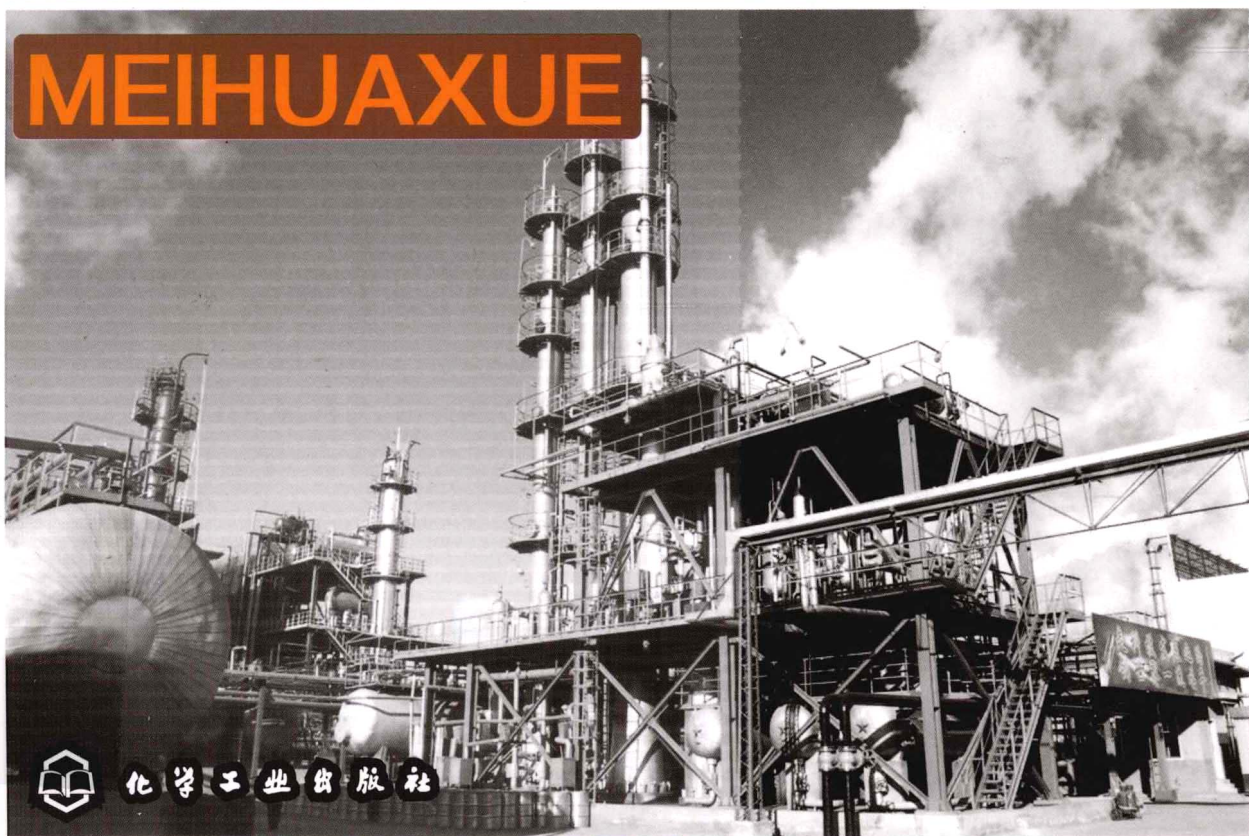
普通高等教育规划教材

煤化学



朱银惠 王中慧 主编
梁英华 主审

MEIHUAXUE



化学工业出版社

普通高等教育规划教材

煤 化 学

朱银惠 王中慧 主编
梁英华 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地叙述了煤的特征和生成、岩相组成与应用、一般性质、工艺性质、分类和评价、化学结构、化学方法的研究及综合利用等,并附有实验部分。

本书为高等院校应用型本科化学工程与工艺(煤化工方向)矿物加工工程、资源勘查工程、应用化学等专业的教学用书,也可作为从事能源、煤燃烧、炭素材料、煤基化学品、煤田地质、采煤、选煤、煤质化验和环境保护等有关管理、研究、设计、技术开发和生产技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤化学/朱银惠,王中慧主编. —北京:化学工业出版社,2013.2
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-16107-9

I. ①煤… II. ①朱…②王… III. ①煤-应用化学-高等学校-教材 IV. ①TQ530

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第304491号

责任编辑:张双进 窦臻
责任校对:王素芹

文字编辑:孙凤英
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数467千字 2013年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

前 言

本教材的编写以应用型人才培养目标为依据，以应用、实用、适用为原则，体现应用理论的系统性，注重理论的应用方法，兼顾应用理论和应用实践的比例，为学生创造性地应用提供范例的训练，有助于学生应用能力和素质的培养。填补了应用型本科煤化工专业煤化学教材的空白。全书共分九章，系统阐述了煤的特征和生成、煤的岩相组成与应用、一般性质、工艺性质、分类和评价、化学结构、化学方法的研究及综合利用等，并附有实验部分。

本书由朱银惠、王中慧主编，由朱银惠负责对全书的统稿。具体编写分工如下，第一章、第三章由朱银惠编写；第二章、第七章、第八章由王润平编写；第四章和实验一、实验二、实验三由薛仁生编写；第五章、第九章和实验四、实验五、实验六由王中慧编写；第六章由王家蓉编写。本书由河北联合大学梁英华教授主审，并提出了许多宝贵意见。在编写过程中也得到了谢全安、王胜春博士的大力帮助，在此谨致衷心的感谢。

本教材主要供大学本科院校应用型化学工程与工艺（煤化工方向）专业教学使用，还可供普通高等学校其他相关专业和企业技术人员作为参考用书。

鉴于编者水平和能力所限，书中不妥之处恳请读者指正，以便以后修改并完善。

编 者

2012 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1	五、影响焦炭光学组织组成的因素	52
一、我国的能源概况及煤炭资源	1	六、焦炭光学组织的应用	54
二、我国煤炭的综合利用情况	3	复习思考题	55
三、煤利用存在的环境问题	4	第四章 煤的一般性质	56
四、煤化学的发展	5	第一节 煤的工业分析和元素分析	56
五、煤化学的内容、特点及研究方法	7	一、煤的工业分析	56
第二章 煤的特征和生成	8	二、煤的元素分析	70
第一节 煤的种类和特征	8	三、分析结果的表示方法与基准换算	80
一、煤的种类	8	第二节 煤的物理性质和物理化学性质	83
二、腐殖煤的外表特征	8	一、煤的密度	84
第二节 煤的生成	11	二、煤的空间结构和表面性质	88
一、成煤的原始物质	11	三、煤的机械性质	91
二、成煤的主要时期和主要煤田	15	四、煤的热性质	94
三、腐殖煤的生成过程	17	五、煤的电性质与磁性质	97
复习思考题	22	六、煤的光学性质	99
第三章 煤的岩相组成与应用	23	七、煤的其他物理性质	100
第一节 宏观煤岩组成	23	复习思考题	102
一、宏观煤岩成分	23	第五章 煤的工艺性质	103
二、宏观煤岩类型	24	第一节 煤的热解	103
第二节 煤的显微组分	25	一、煤热解过程的特征	103
一、煤的有机显微组分	25	二、煤的差热分析	104
二、煤的无机显微组分	28	三、煤的热重分析	105
三、煤岩显微组分的分类与命名	29	四、煤在热解过程中的化学反应	106
第三节 煤岩学的研究方法	33	五、影响煤热解的因素	109
一、煤岩显微组分的分离和富集	33	第二节 煤的黏结与成焦机理	112
二、煤岩分析样品制备方法	34	一、溶剂抽提理论	112
三、煤岩显微组分的反射率	36	二、物理黏结理论	112
第四节 煤岩学的应用	40	三、传氢理论	112
一、煤岩学在煤田地质方面的应用	40	四、胶质体理论	113
二、煤岩学在选煤中的应用	41	五、中间相理论	115
三、煤岩学在煤质评价和煤分类中的应用	41	第三节 煤的黏结性(结焦性)指标	116
四、煤岩学在炼焦配煤与预测焦炭质量	43	一、胶质层指数(GB/T 479—2000)	117
方面的应用	43	二、奥亚膨胀度(GB/T 5450—1997)	119
第五节 煤炭显微组分在炼焦中的变化	48	三、基氏流动度	121
一、光学各向同性组织和光学各向异性	49	四、罗加指数(GB/T 5449—1997)	122
组织	49	五、黏结指数(GB/T 5447—1997)	123
二、焦炭光学组织的镜下特征	49	六、坍塌膨胀序数(GB/T 5448—	124
三、焦炭光学组织的命名和分类	50	1997)	124
四、煤岩显微组分与焦炭光学组织的	52	七、葛金指数(GB/T 1341—2007)	125
关系	52	第四节 煤炭气化和燃烧的工艺性质	126

一、煤的反应性	126	二、煤的抽提率与溶剂性质的关系	182
二、煤的结渣性	127	三、煤的溶剂抽提	183
三、煤的燃点	127	第四节 统计结构解析法对煤结构的	187
四、煤灰的黏度	128	研究	187
第五节 煤的铝甑低温干馏试验	129	一、统计结构解析法的原理	187
第六节 煤的可选性	129	二、煤化学结构的统计解析法研究	189
一、煤的可选性曲线	130	第五节 煤的结构模型	191
二、可选性标准	134	一、煤的大分子结构模型	191
第七节 煤的发热量	135	二、煤的分子间结构模型	196
一、煤发热量的测定	135	三、煤结构的综合模型	198
二、利用经验公式计算煤的发热量	138	第六节 煤分子结构的近代概念	198
三、煤的发热量与煤质的关系	139	复习思考题	199
四、煤的发热量等级	140	第八章 化学方法研究煤	200
复习思考题	140	第一节 煤中的官能团分析	200
第六章 煤的分类和煤质评价	142	一、含氧官能团	200
第一节 煤的分类指标	142	二、煤中的含硫和含氮官能团	201
一、反映煤化程度的指标	142	第二节 煤的高真空热分解	202
二、反映煤黏结性、结焦性的指标	143	第三节 煤的加氢	203
第二节 中国煤炭分类	143	一、煤加氢液化的反应及原理	204
一、中国煤炭分类方案	143	二、煤的深度加氢与轻度加氢	208
二、中国煤炭分类标准	145	第四节 煤的氧化	210
三、中国煤炭编码系统	150	一、煤的氧化阶段	210
四、中国煤层煤分类	152	二、煤的轻度氧化	211
五、各种煤的特性及用途	155	三、煤的深度氧化	212
第三节 国际煤分类	157	第五节 煤的其他化学反应	214
一、硬煤的国际分类	159	一、煤的卤化反应	215
二、褐煤的国际分类 (ISO 2950—1974)	159	二、煤的磺化反应	216
三、最新国际煤分类标准 (ISO 11760: 2005)	160	三、煤的水解	217
第四节 煤质评价	164	复习思考题	218
一、煤质评价的阶段与任务	164	第九章 煤的综合利用	219
二、煤质评价的内容	165	第一节 煤的燃烧和气化	219
三、煤质评价方法	166	一、煤的燃烧	219
复习思考题	167	二、煤的气化	223
第七章 煤有机质的化学结构	169	第二节 煤的液化	226
第一节 煤的化学结构	169	一、方法简介	226
一、煤的基本结构单元	169	二、直接加氢液化 (DCL)	227
二、煤中低分子化合物	174	三、煤的间接液化 (ICL)	228
第二节 物理方法研究煤	174	第三节 煤制化学品和高碳物料	230
一、红外光谱对煤结构的研究	174	一、煤液体与煤制高聚物	230
二、X 射线衍射对煤结构的研究	177	二、煤制塑料	231
三、核磁共振对煤结构的研究	179	三、煤制洁净燃料	232
第三节 物理化学方法研究煤	181	四、煤制高碳物料	234
一、煤溶剂抽提法的分类	181	五、煤制活性材料	235
		第四节 石煤和煤矸石的利用	237
		一、石煤	237

二、煤矸石	238
复习思考题	240
附录	241
实验一 煤的工业分析测定	241
实验二 煤的元素分析	250

实验三 煤中全硫含量的测定	259
实验四 烟煤胶质层指数的测定	262
实验五 烟煤黏结指数的测定	269
实验六 煤的发热量测定	271
参考文献	278

第一章 绪 论

我国是世界上开发利用煤最早的国家。地理名著《山海经》中称煤为“石涅”，并记载了几处“石涅”产地，经考证都是现今煤田的所在地。例如书中所指“女床之山”，在华阴西六百里（1里=500m，下同），相当于现今渭北煤田麟游、永寿一带；“女儿之山”，在今四川双流和什邡煤田分布区域内。然而，我国发现和开始用煤的时代还远早于此。在汉代的一些史料中，有现今河南六河沟、登封、洛阳等地采煤的记载。当时煤不仅当作柴烧，而且成了煮盐、炼铁的燃料。现河南巩县还能见到当时用煤饼炼铁的遗迹。汉朝以后，称煤为“石墨”或“石炭”。可见我国劳动人民不仅有悠久的用煤历史，而且积累了丰富的找煤经验和煤田地质知识。在现代地质学诞生之前，就已经创造出在当时具有一定水平的煤田地质科学技术。

欧洲人用煤的历史比我国晚得多。在元朝来我国工作的意大利人马可·波罗，回国后所写的一部《游记》中描写到：中国有一种黑石头，像木柴一样能够燃烧，火力比木柴强，从晚上燃到第二天早上还不熄灭。价钱比木柴便宜，于是欧洲人把煤当作奇闻来传颂。欧洲人到18世纪才开始炼焦，比中国晚了500多年。

一、我国的能源概况及煤炭资源

1. 能源

能提供能量的物质即称之为能源。它在一定条件下可以转换为人们所需的某种形式的能量。比如薪柴和煤炭，把它们加热到一定温度，就能和空气中的氧气化合并放出大量的热能。我们可以用热来取暖或做饭；也可以用热来产生蒸汽，用蒸汽推动汽轮机，使热能变成机械能；也可以用汽轮机带动发电机，使机械能变成电能；如果把电送到工厂、企业、机关、农牧林区和住户，它又可以转换成机械能、光能或热能。

人类社会的历史在发展中经历了三个能源阶段，即柴草时期、煤炭时期和石油时期。从以柴草为主的能源时期一直到18世纪以前的数千年中，生产力的发展很低下。到了18世纪，煤的开采，蒸汽机的应用，开辟了资本主义的第一次产业革命。19世纪70年代电能的利用，实现了资本主义的工业化，人类才有了现代的物质文明。到了20世纪50年代，以石油为主的能源来临了，不少国家依靠石油实现了现代化。原子能及新能源的利用则使人类进入了高科技时代。

能源的种类很多，包括太阳能、风能、地热能、水能、煤炭、石油、电力、核能、柴薪、沼气、天然气、人工合成煤气等。人们通常把煤炭、石油、电力、柴薪等称之为常规能源；把太阳能、风能、地热能、水能、核能、沼气、天然气、人工合成煤气等称之为非常规能源，也称为新能源。

按能源的形态特征或转换与应用的层次也可以对能源进行分类。如世界能源委员会推荐的能源类型为：固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、电能、太阳能、生物能、风能、核能、海洋能和地热能等。其中，前三个类型统称化石燃料或化石能源。根据能源产生的方式以及是否可再利用可分为一次能源和二次能源、可再生能源和不可再生能源；根据能源消耗后是否造成环境污染可分为污染型能源和清洁型能源等。

能源和材料、信息构成了近代社会得以繁荣和发展的三大支柱。能源是人类文明进步的先决条件，它的开发和利用是衡量一种社会形态、一个时代、一个国家经济发展、科技水平

与民众生活质量的重要标志。人们对能源在人类社会发生与发展史上的重要地位与作用的认知,经历了一个相当长的历史过程。20 世纪 70 年代初与 80 年代初先后爆发两次世界性石油危机以及 90 年代的海湾战争以来,大大增强了人们对能源问题重要性的认识,显示了能源在国际政治、经济、军事格局中的战略地位。

2. 世界能源概况

世界能源储量最多是太阳能,在再生能源中占 99.44%,而水能、风能、地热能、生物能等不到 1%。在非再生能源中,利用海水中的氘资源产生的人造太阳能(聚变核能)几乎占 100%,煤炭、石油、天然气、裂变核燃料加起来也不足千万分之一。所以,人类使用的能源归根到底要依靠太阳能,太阳能是人类永恒发展的能源保证。

世界能源储量分布是不平衡的。石油储量最多的地区是中东,占 56.8%;天然气和煤炭储量最多的是欧洲,分别占 54.6%和 45%;亚洲、大洋洲除煤炭稍多(占 18%)以外,石油、天然气都只有 5%多一点。英国石油(BP)公司 2010 年世界能源年度统计报告显示,至 2009 年底的探明石油储藏量为 13331 亿桶(1 桶=158.987dm³,下同),包括加拿大正在积极开发的油砂和委内瑞拉上调的储量。全球储藏量足以可满足按 2009 年生产量开采 45.7 年。按照同样的基准,天然气储量足够可开采 62.8 年,煤炭为 119 年。

3. 能源消费趋势

国际能源局(IEA)发布了 2010 年《世界能源展望》,以中国和印度为首的新兴经济体将在未来 25 年里驱动全球能源需求。中国的能源需求量在 2008 年到 2035 年间会上升 75%,到 2035 年,中国占世界能源需求的比例将从目前的 17%上升至 22%。

英国石油(BP)公司 2011 年发布能源趋势报告“2030 年能源预测”,预测指出,在今后 20 年内世界能源增长将以新兴经济体为主,能效改进将会加快,可再生能源将占能源增长的 18%。在今后 20 年内一次能源使用增长将近 40%。能源来源增加的多样化及非化石燃料(核能、水力发电和可再生能源)的综合,预计将会第一次成为增长的最大来源。在 2010~2030 年间可再生能源(太阳能、风能、地热和生物燃料)对能源增长的贡献将从 5%增大到 18%。

预计天然气将是增长最快的化石燃料,煤炭和石油占市场份额将会下降,这是因为所有化石燃料都呈现较低的增长率。化石燃料对一次能源增长的贡献预计从 83%下降至 64%。

4. 我国能源概况

我国国土资源丰富,蕴藏的能源品种齐全,储量也比较丰富。从结构上看,煤炭比较丰富,而油气资源总量偏少,与能源需求结构和环境保护需求不相协调,且地区分布也不够均衡。能源资源大部分分布在人口偏少和经济欠发达地区,如煤炭资源偏西偏北,水能资源偏西偏南,两者大都分布在中西部地区。中国统计年鉴,2010 年中国能源探明储量,煤炭 2793 亿吨,石油 31.74 亿吨,天然气 3.78 万亿立方米。

中国能源消耗情况《世界能源统计年鉴》显示,2010 年,中国超过美国成为世界上最大的能源消费国,中国的能源消费量占全球的 20.3%,超过了美国 19%的占比。中国的人口是美国的 4 倍,消费量大或许是情有可原。但从经济规模方面去比较,中国的经济规模只是美国的 1/3。

5. 我国的煤炭资源

我国的煤炭资源相对丰富,其储量约占全国矿产资源储量的 90%,化石能源的 95%,具有巨大的资源潜力。

(1) 煤质 从资源种类的角度看,我国优质煤种资源较少,高变质的贫煤和无烟煤仅占查明资源储量的 17%。我国煤炭资源包括了从褐煤到无烟煤各种不同煤化阶段的煤种,但

其数量分布极不均衡。褐煤资源主要分布在内蒙古东部和云南,由于其发热量低,水分含量高,不适于远距离长途运输,在一定程度上制约了这些地区的煤炭资源开发。炼焦煤数量较少,且大多为气煤,肥煤、焦煤、瘦煤仅占 15%。高硫煤查明资源储量约 1400 亿吨,占全部查明资源储量的 14%,主要分布在四川、重庆、贵州、山西等省(市)。其中烟煤 75%,无烟煤 12%,褐煤 13%;适于炼焦、造气的原料煤占 25%,动力煤占 75%。我国煤炭保有储量平均硫分为 1.10%,硫分小于 1%的煤占 63.5%,硫分大于 2%的煤占 24%;灰分普遍较高,一般在 15%~25%。我国原煤入洗比例不足 40%,而美国、澳大利亚的原煤几乎全部入洗。

(2) 我国煤炭分布特点 2010 年全国煤炭基础储量为 2794 亿吨,集中分布在内蒙古(30.2%)、山西(27.6%)、新疆(5.3%)等省(区)。分布特点如下。

① 分布广泛(除上海、香港外,各行政区都有)。

② 北多南少、西多东少。90%以上的煤炭资源量分布在秦岭-大别山以北,大兴安岭-雪峰山以西的地区。

③ 相对集中。2010 年煤炭基础储量中,山西占 30.2%,内蒙古占 27.6%,新疆占 5.3%,陕西占 4.3%,贵州占 4.2%,河南占 4.1%,安徽占 2.9%。

④ 各地区煤炭品种和质量变化较大,分布不理想。如炼焦煤种一半左右在山西。

二、我国煤炭的综合利用情况

煤不只是燃料,它还是多种工业的原料。根据德国的资料,煤中组分多达 475 种。用煤作原料制成的产品,其经济效益可大幅度提高。以用煤炼焦为例,除主要产品冶金焦炭外,还可获取煤焦油和焦炉煤气。煤焦油可以用来生产化肥、农药、合成纤维、合成橡胶、塑料、油漆、染料、药品、炸药等产品;焦炭除主要用于冶金外,还可用来制造氮肥。焦炉煤气可用于平炉炼钢和焦炉本身的燃料、城市煤气、发电、制取双氧水(H_2O_2),也可作为化肥、合成纤维的原料等。煤的气化、液化在煤的综合利用中更是重要内容。

一般,煤炭作为一次性能源直接燃烧利用。据统计,目前世界总发电量的 47%来自以煤作为燃料的发电厂。近年来,各国大力开发煤转化的技术,如采用将煤转化为二次清洁能源的煤气化和煤液化工艺,可得到流体燃料(煤气和人造液体燃料)。流体燃料在运输和使用上都非常方便,并可大大减少污染。目前正在开发的气化和液化工艺不下数十种,其中一部分已实现工业化。与此同时,细煤粉与水相混制成水煤浆和细煤粉与石油重油相混制成油煤浆作为能源利用的工作取得了很大的进展,有的已应用于工业。

由煤制取化工产品的方法有:焦化、加氢、液化、气化、氧化制腐殖酸类物质以及煤制电石以生产乙炔。其中,将煤气化制成合成气($CO+H_2$),再通过各种合成方法制造多种化工原料(“一碳化学”路线)以及将煤液化制造苯属烃的工艺日益引起人们的重视。

煤炭综合利用包括将煤炭本身作为一次能源,用煤炭制造二次能源、化工原料等几方面。煤炭综合利用系统图如图 1-1 所示。

煤炭的综合利用的方式如下。

1. 几个煤炭利用部门的联合

- ① 采煤-电力-建材-化工;
- ② 采煤-电力-城市煤气-化工;
- ③ 钢铁-炼焦-化工-煤气-建材;
- ④ 炼焦-煤气-化工(三联供)。



图 1-1 煤炭综合利用系统图

2. 几个单元过程的联合

- ① 焦化（或高温快速热解）-气化-液化；
- ② 热解（或溶剂精制）-气化-发电；
- ③ 气化-合成；
- ④ 液化（溶剂精制或超临界萃取）-燃烧-气化；
- ⑤ 液化（超临界萃取）-加氢气化。

此外，还可以有多种方式的联合，通过联合可以大大提高煤的利用效率，推动煤炭应用科学技术的迅速发展。

我国煤炭综合利用情况与发达国家相比，具有起步晚、规模小、发展速度快等特点。目前，我国在煤的综合利用方面虽然做了大量的工作，取得了很大的成绩，但与世界先进水平相比，差距是很大的，且煤炭的终端消费结构也很不合理。我国的煤炭利用以燃烧为主，在加工利用方面比较薄弱，原煤入洗率低，只有 1/4 左右，大部分原煤在使用前不经洗选。因而商品煤质量较差，平均灰分为 20.5%，平均硫分为 0.8%。型煤技术虽已有较长发展历史，但目前，技术与设备的改进与提高效果不尽如人意，技术推广速度缓慢，型煤产量仍较低。动力配煤与水煤浆技术的发展可以说还均处于初级发展阶段。高效固硫剂、助燃剂等尚处于开发和试用阶段。因此，作为世界上第一产煤和用煤大国，我国的煤炭洁净加工与高效利用虽然前途光明，然而却任重道远。

三、煤利用存在的环境问题

煤是不洁净能源，在给人类带来光明和温暖的同时，也给人类赖以生存的环境造成了破坏。

煤所造成的污染贯穿于开采、运输、储存、利用和转化等全过程。就开采而言，仅统配煤矿每年矿井酸性涌水约 14 亿立方米；采煤排放的 CH_4 约占人类活动排放甲烷量的 10%；我国堆积的煤矸石已超过 15 亿吨，占地 86.71 平方公里，矸石堆容易自燃，而且会排放出大量的污染气体和液体；每年约有 6 亿吨煤靠铁路长途运输，使用敞篷车造成约有 300 万吨

煤尘排放在铁路沿线,造成污染。储存煤不仅占去大面积土地,而且储存时间长的煤在氧化、风化作用下,炼焦煤会失去黏结性,煤堆会自燃,造成环境污染。

煤在燃烧过程中造成的污染物有烟尘、烟气和炉渣等。烟尘含有由煤中矿物质、伴生元素转化而来的飞灰和未燃烧的炭粒,据统计,我国每年排放到大气中的烟尘量在 1300~1400 多万吨。每燃烧 1t 煤会排放出 6~11kg 烟尘。烟气含有 SO_2 、 CO_2 、 CO 、 NO_x 、蒸汽以及多环芳烃等烃类化合物和其他有机化合物。其中 CO_2 在大气中含量增多会造成“温室效应”,使气候变暖; CO 是窒息性气体,量大时能在很短时间内使人的大脑缺氧而死亡; SO_2 对人体健康和植物的生长都有危害,它刺激黏膜、引起呼吸道疾病并能使植物枯死;排放到大气中的 SO_2 、 SO_3 和 NO_2 与水蒸气化合生成硫酸和硝酸,这两种酸与水分子结合生成硫酸雾,硫酸雾与烟尘接触形成硫酸尘,与降水接触成为酸雨。酸雨使土壤酸化,使建筑物受到腐蚀,并妨碍植物生长。我国中高硫煤和高硫煤占煤总储量的 1/3。炉渣内含有多种有害物质。全国每年排出的炉渣高达 2 亿多吨,不仅占去大面积土地,而且在堆放过程中流出含有多种重金属离子的酸性废水污染环境。

我国煤的利用以燃烧为主,约 90.4% 的煤用于发电、工业锅炉、炉窑、民用炉灶和铁路。由于燃烧技术落后,供煤不合理而造成煤的利用率很低,这样既浪费能源,又污染环境。据估计全国排放到大气中 80% 的烟尘和 90% 的 SO_2 来自燃煤。

炼焦过程由于炉体结构不严密,排烟除尘装置不完善,排散出大量烟气、粉尘、 CO 、烃类、 H_2S 、 NH_3 、 SO_x 和 NO_x 等。同时排放出的焦油中含有致癌作用的多环芳烃(如 3,4-苯并芘、二苯并蒽等),严重污染大气和工业用水。

煤的气化和液化工艺的优点是可生产比较洁净的气体燃料和液体燃料,消除燃煤所造成的污染,但气化和液化过程本身仍然有污染问题。气化所得煤气中含有 H_2S 、 CO 、 COS 、 NH_3 和 HCN 等污染物;气化洗涤水中含有酚类、焦油、悬浮固体、氰化物和硫化物等污染物。煤的液化产生浮渣、含油废水及 H_2S 、 CO 、 NH_3 和多种有害的多环芳烃气体。

另外,煤中砷燃烧时形成剧毒物质 As_2O_3 进入大气,在人体内累积诱发癌症,因此食品工业用煤的砷含量必须控制在 $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。大气中 As_2O_3 含量国内外规定应小于 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$,水中应小于 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。但某些燃煤电厂附近大气中 As_2O_3 含量高达 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$,滇东、黔西一些地方的晚二叠世龙潭组煤经受后期热液影响,砷的含量极高。

经济的发展应与环境资源相互协调发展,不能以牺牲环境为代价来发展经济,因此如何有效地治理因用煤造成的环境污染就成为紧迫的研究任务,务使煤炭资源的开发利用与环境效益结合起来。我国煤炭利用技术的选择标准应该是:减少环境污染——清洁,提高煤炭使用效率和减少无效投入(如高灰分煤的运输)——高效。为此,需尽早开发多种煤炭利用的新技术,以便使我国的煤炭利用技术在 21 世纪逐步完成向新技术的转变。

四、煤化学的发展

为了满足不同工业对煤质的要求,使各种煤得到充分合理的利用,人们对煤的组成、性质进行了深入细致的研究,促使了煤化学科学的诞生和发展。

煤化学学科诞生于 19 世纪。起初,人们对于煤炭的应用只限于用作燃料,煤化学的研究也主要是在煤的工业分析、元素分析和发热量等简单数据的测定方面。随着煤炭应用日趋广泛,煤化学的研究越来越深入和全面。在科学技术日新月异、飞速发展的当今时代,煤化学的研究已经深入到煤的化学组成、岩石组成、结构及工艺过程机理等一些本质问题及煤炭深加工的新方法和新用途等方面。整个煤化学的发展可以分为以下四个阶段。

1. 萌芽阶段 (1780~1830 年)

在这一时期,人们争论的主要问题是煤的起源。

在 19 世纪前,人们还不能正确解释煤的形成过程,而只能作种种设想。其主要论点有:

- ① 煤是由岩石转化而来的;
- ② 煤是和地球一起形成的,有地球就有煤的出现和存在;
- ③ 煤是由植物转变而成的。

人们通过长期的生产实践,从不同的角度证明:煤是由植物转变而成的,并且主要是由陆生植物生成的。例如,常常可以看到煤层顶板有植物叶部化石,有时还能看到由直立树干变成的煤,并保留了原来断裂树干的形状;人们应用显微镜来研究成煤的原始物质,将年轻煤制成薄片,放在显微镜下观察,可以清楚看到植物原有构造,如细胞结构、年轮、孢子、角质层和木栓层等;从元素分析得知,煤和植物的主要元素组成相同。于是在 1830 年左右,人们普遍认同了该结论。这时,产生了煤化学和煤岩学两个煤炭科学研究的支柱。因此可以认为,1831 年是科学煤炭研究的诞辰。

2. 启蒙阶段 (1831~1912 年)

这个阶段,英国和法国差不多同时开展了用显微镜对煤进行的最早的系统研究。1837 年,在法国展开了对煤的系统化学研究,提出了以元素组成为基础的煤的分类。这些研究为后来的煤岩学和煤化学的发展打下了良好的基础。

3. 经典阶段 (1913~1962 年)

在这一时期,煤几乎是唯一的热源和能源,煤炭广泛应用于机车、航行、炼焦、气化、液化、低温干馏和发电等领域。人们对煤的研究不在停留在外部特征、个别性质的研究上,而是逐步深入到组成、岩相、结构及工艺过程机理等一些本质问题的研究,并且以煤的生成过程来探索引起煤性质和组成多样性的原因,力求把外部性质和现象与内在的组成、岩相及结构紧密联系起来。使煤岩学和煤化学这两门学科逐渐发展并成熟起来。

(1) 在煤岩学方面 美国主要发展了薄片(透射光)技术,德国和法国主要发展了光片(反射光)技术。两种技术都精益求精,日臻完善。后来,德国又开发了薄光片技术,使得两种技术可在同一试样上进行比较。到 1940 年左右,纯定性的煤炭岩石学逐渐向更为定量的煤炭岩相学转化,发展了测定镜质组反射率的显微光度计法,完善了煤岩定量方法,使煤岩学研究达到了相当高的水平。

(2) 在煤化学方面 德国费舍尔首先开发了 F-T 合成法,同时德国伯吉乌斯开发了煤的直接加氢液化法。这两种具有重大意义的煤的转化方法对煤化学的研究起到了巨大的推动作用。

因此,在这个时期,世界各国涌现出许多著名的煤化学家和煤岩学家;出版了大量的重要出版物,对取得的成果进行了科学的总结;也建立了一大批高水平的煤炭研究机构。他们的研究工作涉及煤化学和煤岩学的各个领域。特别是在煤的性质随煤化程度的统计变化方面进行了大量的经验关联工作。通过这种关联可以从煤的工业分析和元素分析数据来预测煤的多种性质。到 1950~1960 年,人们对煤的化学和物理结构有了比较全面的了解,可以用一些如 H/C 和 O/C 原子比、芳碳率和芳氢率等参数来描述煤的结构。并且查明各主要微成分组的各种参数随煤化程度的变化关系。

4. 煤炭研究的衰落和复兴 (1963~1990 年)

20 世纪 60 年代中期,中东等地区大量的廉价石油和天然气动摇了煤炭经济。使煤化学的研究几乎停滞不前。到 70 年代以后,由于石油、天然气价格猛涨及国外某些国家和地区的石油资源日趋枯竭,世界各个国家对煤化学和煤化工的研究重新重视起来。许多国家组织

起大量人力、财力来进行有计划/system研究,并采用了最现代化的科学研究仪器和方法来研究煤。例如,煤质检测中使用的数控仪器准确、快速、方便,大大提高了工作效率,加快了信息反馈速度;基础理论研究中使用的色谱仪、红外光谱仪、X射线衍射仪、核磁共振仪、电子显微镜、电子计算机等仪器,这些技术的相互配合在每个重要的实验室都发挥了重大作用;同时建立了完善的煤化工实验装置和中间试验厂。因此,无论是在煤化学基础理论研究方面,还是在煤的焦化、气化、液化等新技术、新工艺、新产品等的研制方面都获得了重大的突破。这些都将使我们对煤这样复杂的固体的认识更加深刻,更加切合实际,这些新知识还将指导我们对煤进行更有效、更合理的利用。

五、煤化学的内容、特点及研究方法

煤化学是一门独立的学科,但它与许多现代学科如化学、煤田地质学、煤岩学、化学工程学、系统工程学、企业管理学等相互渗透,关系密切。煤化学研究的内容主要包括:

- ① 煤的生成、组成、结构、分析、性质和分类等方面;
- ② 煤的各种转化过程及其机理方面;
- ③ 煤的各种加工产物的组成和性质、煤及其加工产品的合理利用。

通过煤化学的理论研究,可以深入了解煤的特性,解决煤炭利用中的各种问题,开发新的加工技术和开拓新的利用途径,使煤炭资源得到更合理和更有效的利用。

煤是一种特殊的沉积岩,是由许多有机化合物和无机化合物组成的混合物。由于成煤原始物质的复杂性和成煤过程中客观条件的多样性,必然导致煤的组成、结构、性质的复杂性和多样性。在组成、结构、性质等方面,不仅不同的煤之间存在着差异,即使来自同一矿区、同一煤层的煤样,仍会因煤岩组成的不同而有明显的差别。在实际研究工作中,只能得出具体的某一组分的化学结构式,而不可能找出一个能代表所有煤或某一煤种的化学结构式。因此,对煤化学的研究必须同时参照煤岩学的原理和方法,才能更全面、更完整地认识煤的组成、结构和性质。

煤化学是煤炭洗选、煤化工等专业的基础课程。煤化学的学习是在高职高专化学知识的基础上,掌握煤化学的基本知识和基本技能;能够从化学角度理解煤的组成、性质及煤质变化规律和影响因素;培养自己分析问题、解决问题的能力 and 辩证唯物主义观点,并为学好专业课奠定基础。

煤化学是一门实践性很强的学科,处于迅速发展之中,在许多方面仅有定性的描述而无定量的测定,许多理论问题需要进行进一步研究探索,许多新的应用领域尚待开拓。随着科学技术的发展,煤炭资源综合开发利用的途径必将会日趋广泛,人们对煤的研究和认识也会更加深入和全面。我们应认真学习和总结前人的经验进行学习和研究。要刻苦钻研,勇于创新,使煤化学这一发展中的学科迅速发展和完善起来。

第二章 煤的特征和生成

煤是由一定地质年代的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作用而形成的有机生物岩，是多种高分子化合物和矿物质组成的混合物。它是极其重要的能源和工业原料。煤生成过程中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，并直接影响到煤的开采、洗选和综合利用。

第一节 煤的种类和特征

一、煤的种类

根据成煤植物和生成条件的不同，煤可分为腐泥煤和腐殖煤两大类。

1. 腐泥煤

是指由低等植物和浮游生物经腐泥化作用和煤化作用形成的煤。根据植物遗体分解的程度，可分为藻煤和胶泥煤。藻煤中藻类遗体大多未完全分解，镜下可见保存完好、轮廓清晰的藻类。胶泥煤中藻类遗体多分解完全，已看不到完整的藻类残骸。腐泥煤中矿物质含量较高，光泽暗淡，常呈褐色，均匀致密，贝壳状断口，硬度和韧性较大，易燃，燃烧时有沥青味。腐泥煤常呈薄层或透镜状夹在腐殖煤中，有时也形成单独的可采煤层。

2. 腐殖煤

是指由高等植物的遗体经过泥炭化作用和煤化作用形成的煤。腐殖煤是因为植物的部分木质纤维组织在成煤过程中变成腐殖酸这一中间产物而得名。腐殖煤是在自然界中分布最广、蕴藏量最大、用途最广的煤。绝大多数腐殖煤都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。

由于储量、用途和习惯上的原因，除非特别指明，人们通常讲的煤，就是指主要由木质素、纤维素等形成的腐殖煤。

腐殖煤与腐泥煤具有不同的外表特征和性质，其主要特征区别见表 2-1。

表 2-1 腐殖煤与腐泥煤的主要特征

特 征	腐泥煤	腐殖煤
颜色	多数为褐色	褐色和黑色,多数为黑色
光泽	暗	光亮者居多
用火柴点燃	燃烧,有沥青气味	不燃烧
氢含量/%	一般大于 6	一般小于 6
低温干馏焦油产率/%	一般大于 25	一般小于 20

二、腐殖煤的外表特征

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。根据煤化程度的不同，腐殖煤又可分为泥炭、褐煤、烟煤以及无烟煤四个大类。每一种类型的腐殖煤具有不同的特征和性质，因此它们的利用途径也有很大的差异。

1. 泥炭

泥炭又称草炭和泥煤，它是沼泽地区植物残体在高温和地表通气不良的情况下，在厌氧微生物的作用下不能完全分解，经过长期不断堆积形成的。泥炭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，因此泥炭中的木质素和碳水化合物含量较高。泥炭含水量很高，可高达 85%~95%。开采出的泥炭经自然干燥后，水分可降至 25%~35%。干泥炭为棕黑色或黑褐色土状碎块。

我国泥炭储量约 270 亿吨，80% 属裸露型，20% 属埋藏型。主要分布于大小兴安岭、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。泥炭的硫含量平均为 0.3%（质量分数），属于低硫燃料，经气化可制成气体燃料或工业原料气，经液化可制成液体洁净燃料；泥炭焦化所得泥炭焦是制造优质活性炭的原料；泥炭通过不同溶剂萃取，可得到苯沥青、碳水化合物等重要的化工原料。泥炭能去除废水中的金属离子，是一种有效的吸附及过滤介质。泥炭还可以作为土壤改良剂和饲料添加剂，以及食用菌培养基。泥炭的开发和利用已引起国内外的广泛重视，近年来发展十分迅速。

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。褐煤大多数无光泽，外观呈褐色或黑褐色，真密度 $1.10 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 。褐煤含水量较高，达 30%~60%，自然干燥后水分降至 10%~30%。褐煤易风化变质，含原生腐殖酸，含氧高，化学反应性强，热稳定性差。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，且呈层分布状态。

根据外表特征，可将褐煤分为土状褐煤、暗褐煤、亮褐煤和木褐煤四种。

(1) 土状褐煤 它是泥炭变为褐煤的最初产物，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形成的一种特殊形态的褐煤。

我国褐煤资源丰富，已探明储量达 1303 亿吨，主要分布在东北、西北、西南、华北等地，集中在内蒙古、云南和黑龙江等省，其中内蒙古的褐煤储量最大，占全国褐煤储量的 77%。

褐煤适宜成型作气化原料；其低温干馏煤气可用作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；褐煤是一种优质的热解原料，热解后产生的热解煤气是一种热值较高的优质燃料，可作为生活燃料用气和化工合成气，热解后生成的半焦孔隙发达，可以作为吸附材料生产活性炭，具有低灰、低硫、固定碳高的特点；将褐煤制成（蒽）油煤浆后催化加氢，褐煤有机质的 80% 可以转化成气态和液态产品，油收率约占 35%；褐煤经溶剂抽提所得褐煤蜡，具有熔点高、化学稳定性好、防水性强、导电性强、耐酸、强度高和表面光亮等特性，可用作表面活性剂、表面光亮剂、疏水剂、色素溶剂和吸油介质等；褐煤加硝酸进行轻度氧化分解就可得到收率较高的硝基腐殖酸，可用作土壤改良

剂、污水处理剂和有机肥料。此外，褐煤的微生物转化与利用由于具有能耗转化条件温和、转化效率高、污染小等优点而越来越受到关注。但褐煤易风化破碎，故一般不宜长途运输，同时由于水分较高、热值低导致燃烧效率不高。因此，合理有效地开发利用褐煤资源是一个迫切需要解决的问题，应予以高度重视。

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。与泥炭和褐煤相比，烟煤中不含有游离腐殖酸，其腐殖酸已缩合为更复杂的中性腐殖质。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。外观呈黑色，硬度较大，真密度较高（ $1.20 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ ）。

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、 $1/2$ 中黏煤、气煤、气肥煤、 $1/3$ 焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫瘦煤和贫煤等。

烟煤是炼焦、炼油、气化、低温干馏及化学工业等的原料，也可直接用作燃料。在烟煤中，气煤、气肥煤、 $1/3$ 焦煤、肥煤、焦煤和瘦煤都具有不同程度的黏结性。传统观念认为这些煤是炼焦的主要原料煤，故称之为炼焦煤。随着煤准备与炼焦工艺的发展，扩大了炼焦用煤的资源。新的炼焦技术已能使用所有的烟煤，甚至无烟煤作为原料成分，不再仅仅局限于这些传统炼焦煤。此外，烟煤还可用于燃料电池、催化剂或载体、土壤改良剂、过滤剂、建筑材料、吸附剂处理废水等。

4. 无烟煤

无烟煤俗称白煤或红煤，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，它的含碳量最高（90%以上），挥发分低（小于10%），真密度大（ $1.35 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$ ），硬度最高，化学反应性弱，燃点高达 $360 \sim 410^\circ\text{C}$ 以上，无黏结性。

我国无烟煤预测储量为4740亿吨，占全国煤炭总资源量的10%。主要分布于山西省、河南和贵州等地。

无烟煤主要用作民用、发电燃料；制造合成氨的原料；制造电极、电极糊和活性炭等炭素材料的原料；煤气发生炉造气的原料；低灰低硫、可磨性好的无烟煤还适用于作新法炼焦的原料、高炉喷吹和烧结铁矿的原料，以及生产脱氧剂、增碳剂等。

上述四种腐殖煤的主要特征与区分标志如表2-2所示。

表 2-2 四类腐殖煤的主要特征与区分标志

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	大多数无光泽	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-棕黑	褐色	无色	无色
在稀的 HNO ₃ 中	棕红	红色	无色	无色
自然水分	多	较多	较少	少
密度/(g/cm ³)	—	$1.10 \sim 1.40$	$1.20 \sim 1.45$	$1.35 \sim 1.90$
硬度	很低	低	较高	高
燃烧现象	有烟	有烟	多烟	无烟