

煤炭能源工业生态学

王灵梅 著



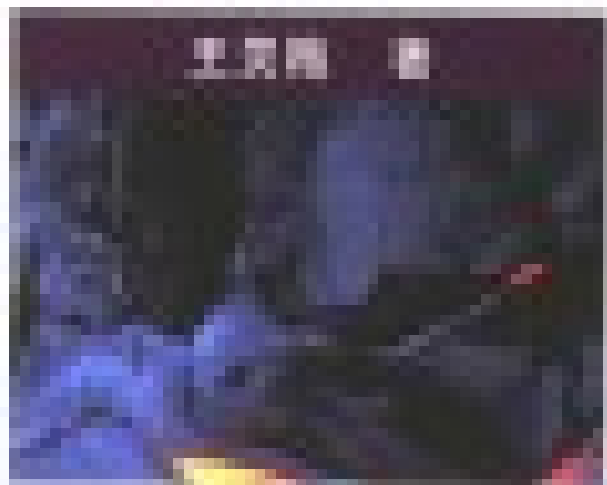
Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境·能源出版中心

煤炭能源工业生态学

王天梅 著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
CHINESE CHEMICAL INDUSTRY PRESS

煤炭能源工业生态学

王灵梅 著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北 京 ·

煤炭能源工业生态学是一门在多重尺度上对煤炭工业进行利用、管理的科学,是对煤炭能源工业和工业生态学研究范畴的拓展。内容包括:煤炭资源的状况、战略地位及利用现状;煤炭能源工业生态学的理论基础;煤炭能源工业生态学理论方法;以煤炭利用企业为核心的生态工业园。

本书可供能源、环境、化工等领域工作的学者、科研人员、工程技术人员和行政管理决策人员参考,也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤炭能源工业生态学/王灵梅著. 北京:化学工业出版社, 2006.5
ISBN 7-5025-8721-7

I. 煤… II. 王… III. 煤炭工业-能源经济-生态经济-研究-中国 IV. F426.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051978 号

煤炭能源工业生态学

王灵梅 著

责任编辑:管德存

文字编辑:伍大维

责任校对:蒋宇

封面设计:史利平

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 7¼ 字数 186 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8721-7

定 价:22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

坚持以人为本、发展循环经济、实现可持续发展是当今时代的主题，煤炭能源可持续利用是其重要的部分。

煤炭是不可再生资源，需要节约利用；煤炭又是能源，需要进一步提高其能量转化效率；煤中含有硫、氮、碳元素，直接燃烧会造成环境污染，需要研究如何将其转化为可直接利用的副产品；煤矿与环境的关系要求在进行煤炭的开采、利用时必须考虑生态环境及其社会问题。

洁净煤技术是从过程层次改善煤的利用的经济性和环境特性的有效途径。然而，今后不能将煤炭工业过程或工程决策再当成一个孤立的对象来考察研究，必须考虑煤炭工业过程与人类社会及生态环境的交互作用，而且针对这种大型复杂系统必须开发创新的研究方法及手段。

工业生态学是一门研究人类工业系统和自然环境之间的相互作用、相互关系的学科。工业生态学是一个强有力的多视角工具，通过它，可审视工业和技术的影响及其在社会和经济中相关的变化。工业生态学的基本思想是仿照自然界生态系统中物质流动的方式来重新规划工业生产、消费和废物处置系统，它追求系统内从原料、中间产物、废物到产品的物质循环，从而达到资源、能源、投资的最优利用，减轻人类活动对自然环境的影响。

工业生态学的重要价值在于将其理论方法应用于不同学科、行业，指导该学科、行业，实现可持续发展。

早期的工业生态学关注于机电制造工业。典型的如生态工业与汽车制造，复印机与功能经济，生态设计等。工业生态学与化学工业结合，提出化工生产要模拟生态系统的功能，建立相当于生产者、消费者和分解者的化工生态链，以低消耗、无污染（少污染）、资源再生、废物综合利用、分离降解等方式，实现化工生产的生态循环。

工业生态学理论应用于能源工业，已提出非碳能源与清洁能源的观点。针对工业革命以来，以碳氢化合物为主的矿物资源利用过程中存在的温室效应、酸雨等许多环境问题，提出了能源脱碳战略：以石油替代煤炭，然后以天然气替代石油；采用相对脱碳的办法，即从单位燃料中汲取更多的能量，比如通过提高涡轮机的转速；少用化石能源；转换矿物燃料，如将碳和氢分开使用；或在较高层次上实施减少化石能源的使用、提高能源利用效率，如美国在进入 21 世纪前，提出的 Vision 21，又称 21 世纪能源工厂。在中国，倪维斗院士等倡导发展多联产能源系统、二氧化碳减排与埋存的未来能源系统就是工业生态学理论在能源工业的应用案例。

然而实现煤的可持续利用是一项复杂的系统工程，需要考虑煤炭既是资源又是能源的特点，考虑煤炭的全生命周期，包括开采-运输-利用-副产品处置，考虑经济-环境-社会维度，建立煤在不同利用尺度包括分子-单元-过程-企业-区域可持续利用的理论和方法。煤炭能源工业生态学是将工业生态学原理应用于煤炭能源工业，并与煤炭能源工业的理论、方法相结合，在多重尺度上对煤炭工业进行可持续利用、管理的科学，是对煤炭能源工业理论和工业生态学理论研究范畴的拓展。发展煤炭能源工业生态学是促进可持续发展具有可操作性的理论。

本书提出了煤炭能源工业生态学这一概念，并尝试建立了其理论和方法，旨在揭示所研究现象的普遍规律和基本特征，并在此基础上为工程设计提供理论依据和相应的计算方法。希望根据煤炭能源工业生态学的研究结果，为煤炭能源系统生态工程提供完整的设计方法与手段，确保煤炭可持续利用目标的实现。

本书中所进行的这一尝试是初步的，还有许多问题值得深入研究。作者衷心地希望对煤炭能源可持续利用有兴趣的同行们对本书提出宝贵的意见，并提出自己的学术见解。一种新的理论只有通过具体的讨论，给予肯定或否定、补充、修正，才会进一步完善与发展。尽管本书在探索煤炭可持续利用方面迈出的这一步仅仅是开始，然而这是重要的一步。在此要感谢我的导师中国工程院院士、

清华大学倪维斗教授、李政教授和北京师范大学张金屯教授的培养和支持，感谢所有老师、亲友和同事的鼓励和帮助。

由于条件和水平所限，在编写过程中不免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

王灵梅

2006 年 5 月

目 录

第 1 章 煤炭资源的状况、战略地位及利用现状	1
1.1 煤炭资源状况	1
1.1.1 世界煤炭资源	1
1.1.2 中国煤炭资源	2
1.2 煤炭能源的战略地位	2
1.3 煤炭利用及其环境生态和社会问题	3
1.3.1 煤炭及其副产品的利用方式	3
1.3.2 煤炭开采、加工、利用形成的环境生态和社会问题	4
1.3.3 原因分析	6
1.4 煤炭资源需要实现全生命周期的可持续利用	7
第 2 章 煤炭能源工业生态学的理论基础	9
2.1 可持续发展理论	9
2.2 循环经济理论	10
2.3 生态学理论	11
2.3.1 “关键种”理论及其对构筑企业共生体的指导作用	11
2.3.2 食物链及食物网理论的应用研究	12
2.3.3 生态位理论及其应用研究	14
2.3.3.1 生态位理论简介	14
2.3.3.2 生态位理论的应用	15
2.3.4 生态系统多样性理论应用研究	17
2.3.5 生态系统耐受性理论的应用	17
2.4 系统工程理论	18
2.5 工业生态学理论	19
2.5.1 工业生态学的定义	19
2.5.2 工业生态学的理论框架结构	20
2.5.3 工业生态学原理	21
2.5.4 工业生态学的关键问题	22
2.5.5 工业生态学的主要研究领域及进展	22

2.5.5.1	工业系统与自然生态系统关系的理论	22
2.5.5.2	原料与能量流动分析 (工业代谢分析)	23
2.5.5.3	物质减量化和能源脱碳	24
2.5.5.4	生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) ...	25
2.5.5.5	为环境设计 (Design for Environment, DfE) ...	26
2.5.5.6	延伸生产者的责任	27
2.5.5.7	生态工业园	28
2.5.5.8	产品导向的环境政策	29
2.5.5.9	生态效益	30
2.5.6	工业生态学的实践应用	31
2.5.6.1	机电产品绿色制造	32
2.5.6.2	工业生态学理论在材料方面的应用	33
第3章	煤炭能源工业生态学理论	34
3.1	煤的结构、组成和分类	34
3.1.1	煤结构模型的发展	34
3.1.2	煤的组成及其性质	37
3.1.3	煤的分类	40
3.2	煤矿与环境的关系	41
3.3	煤炭能源工业生态学理论和方法	42
3.3.1	定义和研究框架	42
3.3.2	能量系统理论	44
3.3.2.1	热力学第一定律	45
3.3.2.2	热力学第二定律及焓分析	46
3.3.2.3	热力学第三定律	51
3.3.2.4	热力学第四定律	51
3.3.2.5	热力学第五定律	52
3.3.2.6	热力学第六定律	52
3.3.3	系统集成优化理论	53
3.3.3.1	物质集成	53
3.3.3.2	能量集成	57
3.3.3.3	水集成	60

3.3.3.4	信息集成	61
3.3.4	项目技术经济性的评价	62
3.3.4.1	投资回收期法	62
3.3.4.2	净现值法	62
3.3.4.3	内部收益率	63
3.3.5	生命周期成本评估	63
3.3.5.1	生命周期成本评估方法	63
3.3.5.2	生命周期成本评估案例	65
3.3.6	生命周期评价方法在煤利用技术中的应用	67
3.3.6.1	生命周期评价方法	67
3.3.6.2	不同煤利用技术的生命周期评价	71
3.3.7	工业代谢	75
3.3.7.1	工业代谢分析简介	75
3.3.7.2	工业代谢分析案例	76
3.3.8	不同尺度煤利用系统的能值分析	76
3.3.8.1	能值分析理论与方法	77
3.3.8.2	能值分析案例	79
3.3.9	煤炭可持续利用政策理论	85
第4章	煤炭的洁净利用技术	87
4.1	煤炭清洁开采	87
4.1.1	煤矿开采合理规划	87
4.1.2	矿井水的资源化及污染控制	88
4.1.2.1	尽量减少矿井水涌出的开采技术	88
4.1.2.2	矿井水清污分流排放、矿井水资源化技术	89
4.1.2.3	减少矿井水的污染	89
4.1.3	控制或减少煤矸石排出量	89
4.1.4	减少控制矿井废气和粉尘排放	90
4.1.4.1	矿井废气抽放与利用	90
4.1.4.2	采用控制炸药爆破造成废气污染环境的开采 技术	90
4.1.4.3	严格控制井下煤炭的自然	91

4.1.5	控制地面沉陷的开采技术	91
4.1.5.1	特殊开采法	91
4.1.5.2	离层带高压充填法	92
4.1.6	煤炭地下气化采煤新技术	92
4.2	煤炭加工	92
4.2.1	跳汰选煤	93
4.2.2	重介质选煤	95
4.2.3	浮游选煤	95
4.3	煤的气化技术	96
4.3.1	煤气化	97
4.3.1.1	煤气化的分类	98
4.3.1.2	流化床气化法及其典型气化炉	99
4.3.1.3	气流床气化法及其典型气化炉	104
4.3.1.4	中国的煤气化技术	110
4.3.2	整体煤气化联合循环 IGCC	114
4.3.2.1	IGCC 的技术特点和工艺组成	114
4.3.2.2	经济性和环境特性	116
4.3.2.3	IGCC 示范电站	116
4.3.2.4	发展 IGCC 技术对中国具有重要意义	127
4.4	煤基多联产技术	127
4.4.1	多联产系统类型	129
4.4.1.1	简单并联型多联产系统	130
4.4.1.2	综合并联型多联产系统	131
4.4.1.3	简单串联型多联产系统	132
4.4.1.4	综合串联型多联产系统	133
4.4.1.5	串并联综合型多联产系统	134
4.5	国外环境友好的能源系统	135
4.6	煤的液化技术	137
4.6.1	煤的直接液化	138
4.6.1.1	煤直接液化的基本原理	138
4.6.1.2	煤直接液化的一般工艺过程	139

4.6.1.3 几种典型的煤直接液化工艺	140
4.6.2 煤的间接液化	141
4.6.2.1 经典 F-T 合成的基本原理及工艺特点	142
4.6.2.2 几种间接液化的典型工艺	145
4.6.3 煤间接液化和煤直接液化比较	147
第 5 章 以煤炭利用企业为核心的生态工业园	150
5.1 生态工业园 (Eco-Industrial Park, EIP) 定义及特征	150
5.2 生态工业园及其研究进展	151
5.3 生态工业园的生态规划方法	154
5.3.1 园区规划的指导思想和基本原则	154
5.3.1.1 指导思想	154
5.3.1.2 基本原则	154
5.3.1.3 园区规划的步骤	155
5.3.1.4 园区的规划方法和技术	156
5.3.1.5 生态工业园区中的企业孵化器	160
5.3.1.6 生态工业园区规划文本的编制	160
5.4 以煤炭利用企业为核心的生态工业园	161
5.4.1 火电厂生态工业园	161
5.4.1.1 火电厂末端治理状况及分析	162
5.4.1.2 独立运行火电厂的生态企业层次的结构及分析	163
5.4.1.3 火电厂生态工业园	164
5.4.1.4 火电厂生态工业园的发展概况和研究进展	166
5.4.1.5 火电厂生态工业园的建设方案	167
5.4.1.6 多联产生态工业园 (网)	170
5.4.2 煤炭资源全生命周期集成优化利用模式	173
5.5 以煤炭利用企业为核心的生态工业园的生态规划	175
5.6 以煤炭利用企业为核心的生态工业园的评价指标体系	176
5.6.1 以煤炭利用企业为核心的生态工业园区发展评价	

指标体系设计原则	176
5.6.2 以煤炭利用企业为核心的生态工业园的评价指标构成	177
5.6.3 以煤炭利用企业为核心的生态工业园区发展评价指标体系框架设计	178
5.6.4 火电厂生态工业园可持续发展评价指标权重的确定	181
5.6.5 模糊综合评价方法与模型	182
5.6.5.1 隶属度的概念	182
5.6.5.2 评价等级与隶属函数	182
5.6.5.3 隶属函数及子目标模糊评价矩阵	183
5.6.5.4 单因素模糊评价矩阵及综合评价结果	183
5.7 火电厂生态工业园的系统动力学模拟	184
5.7.1 火电厂生态工业园的因果关系图	184
5.7.2 火电厂生态工业园的各子系统的流图和方程式	185
5.7.2.1 人口子系统	185
5.7.2.2 产业子系统	187
5.7.2.3 环境资源子系统	188
5.7.2.4 园区收入子系统	189
5.7.2.5 科技创新、环境生态质量对系统影响的考虑	190
5.8 实例：朔州火电厂生态工业园的生态规划	190
5.8.1 规划原则	190
5.8.2 总体目标	191
5.8.3 现状分析	191
5.8.4 朔州火电厂生态工业园生态规划	193
5.8.4.1 朔州火电厂生态工业园工业生态系统规划	194
5.8.4.2 朔州火电厂生态工业园的景观生态建设	197
5.8.4.3 朔州火电厂生态工业园的管理	199
5.8.5 朔州火电厂生态工业园的系统动力学模拟调控	199
5.8.6 朔州火电厂生态工业园的能值分析	203
参考文献	207

第 1 章 煤炭资源的状况、战略地位 及利用现状

1.1 煤炭资源状况

1.1.1 世界煤炭资源

煤炭是地球上蕴藏量最丰富、分布地域最广的化石燃料。表 1-1 列出了世界煤炭可经济开采储量分布情况。表 1-2 示出 2002 年底世界煤炭已探明的可经济开采储量。

表 1-1 世界煤炭可经济开采储量分布情况

单位：百万吨

国家和地区	无烟煤和烟煤	次烟煤和褐煤	总 量	储采比
美国	115891	134103	249994	252
德国	23000	43000	66000	317
哈萨克斯坦	31000	3000	34000	464
波兰	20300	1860	22160	138
俄罗斯	49088	107922	157010	—
乌克兰	16274	17879	34153	412
欧洲和欧亚大陆	144874	210496	355370	306
南非	49520	—	49520	221
非洲和中东	56881	196	57077	247
澳大利亚	42550	39540	82090	243
中国	62200	52300	114500	82
印度	82396	2000	84396	235
亚太地区	189347	103124	292471	126

表 1-2 世界煤炭已探明的可经济开采储量 (2002 年底)

煤 炭/亿吨		
储量	年开采量	储采比/年
9844.53	48.33	204

按目前的煤炭消费水平计算,世界煤炭资源可供开采 200 多年。世界各地的煤炭资源分布并不平衡,煤炭主要集中在北半球,世界煤炭资源的 70% 分布在北半球北纬 30°~70° 之间。其中,亚洲和北美洲分别占全球地质储量的 58% 和 30%,欧洲仅占 8%;南极洲数量很少。世界煤炭可采储量的 60% 集中在美国 (25%)、前苏联 (23%) 和中国 (12%),此外,澳大利亚、印度、德国和南非 4 个国家共占 29%。2001 年,上述 7 国的煤炭产量占世界总产量的 80%。澳大利亚、美国和加拿大可供炼焦的优质烟煤储量丰富,2002 年 3 个国家的炼焦煤总产量占世界贸易总量的 81%。

1.1.2 中国煤炭资源

按中国煤炭地质总局 1999 年第三次全国煤炭资源预测,全国煤炭资源总量为 55700 亿吨,但探明煤炭储量为 10421.35 亿吨,探明可经济开发的剩余总储量为 1145 亿吨,在探明储量中,烟煤占 75%,无烟煤占 12%,褐煤占 13%。按煤种分类,其中炼焦煤类占 27.65%,非炼焦煤类占 72.35%。品种齐全,但不均衡。中国煤炭储量主要分布在华北、西北地区,集中在昆仑山—秦岭—大别山以北的北方地区,以山西、陕西、内蒙古等省区的储量最为丰富。

总之,煤炭作为不可再生资源,储量有限,需要节约利用。

1.2 煤炭能源的战略地位

从全球范围来看,煤炭在一次能源中占有较大的比重。图 1-1 为 2003 年世界一次能源的消费结构,其中石油占 41.2%,位居第

一；煤炭占 22.2%，位居第二；天然气占 21.4%，位居第三。

近年来，世界的能源消费尽管在核能、水力、地热、生物质等其他形式能源利用方面取得了重要发展，但仍以化石燃料的消费量为主，约占总量的 90%。

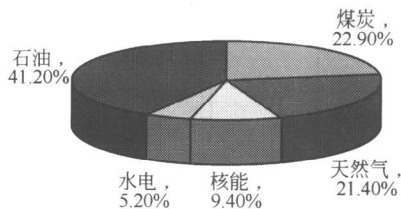


图 1-1 2003 年世界一次传统能源消费结构

中国是一个煤炭资源丰富、石油和天然气资源

缺乏的国家。从 2000 年开始，中国煤炭产量连续四年增长，从 2000 年的 10 亿吨低谷，上升到 2004 年的约 19.56 亿吨，比 2000 年增长 90%。2005 年，全国原煤产量完成 21.1 亿吨，与 2004 年同期相比增加 1.54 亿吨，增长 7.9%。在我国的能源消费结构中，煤炭占据主导地位，2003 年煤炭在我国一次能源消费总量中所占比例为 67.1%。目前，虽然随着经济发展，其他一次能源（石油、天然气）的消费逐渐增多，但是中国富煤、贫油、少气的能源储备特点和经济发展阶段特点，决定了煤炭仍是中国最主要的一次能源。尽管对中国未来能源需求的预测有不尽相同的结果，但基本结论都显示以煤为主的格局将长期存在。预计到 2020 年中国一次能源需求量至少达 25 亿~33 亿吨标煤，比较集中的估计是 29 亿~30 亿吨标煤，是 2002 年能源消费的两倍，其中煤炭 21 亿~29 亿吨，煤炭消费占一次能源比重仍在 60% 左右。

1.3 煤炭利用及其环境生态和社会问题

1.3.1 煤炭及其副产品的利用方式

图 1-2 示出传统的煤及其副产品的利用模式。煤炭主要用于能源生产和化工生产。其中能源生产主要是利用煤炭的直接燃烧产生能量来进行发电、供热、提供动力等。在化工生产中，煤主要是作为基础原料使用。在目前的工业生产体系中，煤炭资源基本上是一

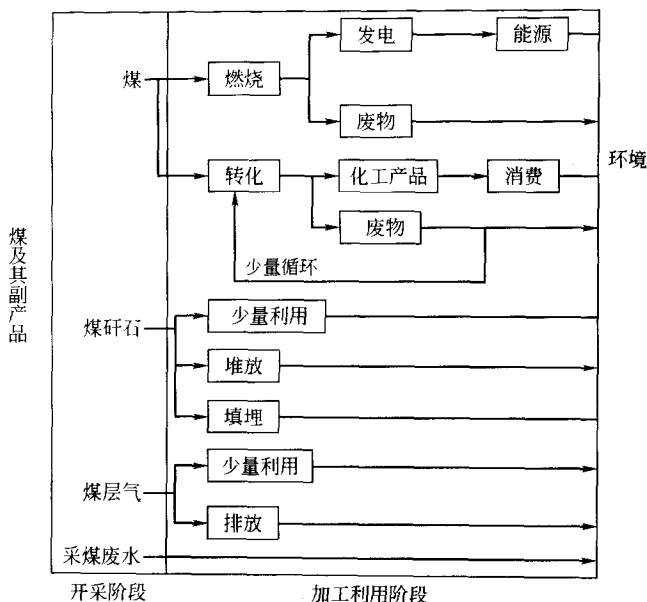


图 1-2 传统的煤及其副产品的利用模式

种单向流动，即人们从自然界中索取大量煤炭资源，在满足人们生产生活需求后，又将大量的废物和污染物排放到环境中。虽然在化工生产中存在部分物质的循环利用，但比例相对很小。

煤炭环境生态问题涉及煤炭开采、加工、储运和使用的全过程，而且煤炭生态环境问题的产生是一个多环节、多因素的复杂过程。所谓多环节指环境问题形成于煤炭开采、加工、储运和燃烧使用的全过程；所谓多因素指环境问题的形成与技术、资金、管理方式、政策导向和思想观念等多因子相关。

1.3.2 煤炭开采、加工、利用形成的环境生态和社会问题

(1) 煤炭开采过程

① 对土地资源的破坏和占用

煤炭开采分为井工和露天两大方式，其中，中国 95% 以上的