



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

能源工程概论

刘柏谦 洪慧 王立刚 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

能源工程概论

刘柏谦 洪 慧 王立刚 编著



化学工业出版社

·北京·

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书分为两篇，在常规能源篇中介绍了常规能源、能量储存技术、工业企业自备电厂及其蒸汽管道系统、联合发电工程、火电厂投资评估和能源工程的环境评估；在新能源篇中介绍了洁净煤技术和煤的洁净料生产、新能源和可再生能源（包括太阳能、生物质能、地热能、海洋能、风能及风力发电、氢能与燃料电池、氢能、燃料电池、核能、可燃冰）、清洁能源促进技术等内容。

本书可作为高等院校能源、环境、冶金、化工、等专业师生的教材，也可供相关专业技术人员、管理人员和政府部门管理人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

能源工程概论/刘柏谦, 洪慧, 王立刚编著. —北京: 化学工业出版社, 2009.1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-04453-2

I. 能… II. ①刘…②洪…③王… III. 能源-工程-高等学校-教材 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 205917 号

责任编辑: 杨 菁
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 荣世芳
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 14½ 字数 387 千字 2009 年 4 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: 26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

能源是人类文明赖以发展的重要物质基础，也是人类社会可持续发展的重要条件。在工业化和现代化进程中，人们越来越感受和认识到人类在获取和利用能源的同时也几乎是不可逆地伤害了自己生存的地球。尽管经常传来油田、气田、煤田等资源勘探的好消息，但自然资源总是有限的。为占有或争夺能源资源引发冲突和战争、为获得能源和生活资料而大量砍伐原始森林等人类行为在伤害人类赖以生存的地球的同时，也为自己后代的可持续生存和发展设置了艰难和障碍。

能源科技的一个重要方面就是高效和环境友好地利用能源并保证人类后代的可持续发展，新的、清洁的、安全和可靠的能源供应和利用能源系统已经成为各国政府追求的目标之一。各国相继对常规能源实施技术完善（如不断提供新的燃烧技术、不断提高火力发电厂机组参数和容量），不断开发和深化新能源和可再生能源，不断加大能源工程的人力、物力和财力投入，依靠科技进步，将技术节能和政策节能紧密关联起来，从整个社会的大角度建立可持续发展的能源系统。

随着科技进步和人们对能源认识的加深，节能优先、优化能源结构、煤炭的多元开发和清洁利用、环境友好地利用化石燃料、保障能源安全、建立和执行国家能源发展战略等成为保证我国可持续能源系统最主要的政策措施。

本书由刘柏谦主编，全书分为常规能源和新能源两篇。在常规能源篇里介绍了常规能源和中国能源工业概况、能源工程的环境评估、能量储存系统、联合发电工程、企业自备电厂、电厂投资评估等内容；新能源篇介绍煤炭清洁利用、新能源理论和技术、新能源促进政策等内容。本书编写分工如下：第一篇由刘柏谦（第一章、第三章、第四章、第五章）、王立刚（第二章、第六章）编写，第二篇由洪慧、刘柏谦编写。清华大学姚强教授对本书第一稿进行了全面审阅，提出了许多宝贵意见和建议，在此对姚强教授的辛勤劳动表示衷心感谢。

近年来，能源和环保领域发展十分迅猛，新理论和新技术不断出现，已经成为研究和投资的重要领域。由于作者时间和水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编 者
2008年9月

目 录

第 1 篇 常规能源概论

第 1 章 常规能源和中国的能源工业	2	第 3 章 能量储存系统	32
1.1 煤炭	2	3.1 导言	32
1.1.1 煤的成分和煤质指标	2	3.1.1 电力储能	32
1.1.2 煤的分类	5	3.1.2 热力储能	34
1.1.3 中国的煤炭资源	5	3.2 能量储存系统	34
1.1.4 工业用户对煤质的要求和主要 煤质指标	9	3.2.1 转化成水压头储能	35
1.2 燃料油	11	3.2.2 压缩空气储能	36
1.3 燃料气	12	3.2.3 飞轮储能	38
1.4 能源利用设备——锅炉	15	3.2.4 电池储能	40
1.5 中国能源发展状况	16	3.2.5 超导磁流体储能	40
1.5.1 能源问题	16	3.2.6 显热储能	42
1.5.2 能源现实	17	3.2.7 潜热储能	43
1.5.3 可持续的能源系统	17	3.2.8 化学储能	44
1.5.4 中国能源供应形势	19	3.2.9 储能技术发展	46
第 2 章 能源工程的环境评价	21	第 4 章 联合发电工程及其设计	53
2.1 能源项目环境评价的依据	21	4.1 基本热力循环	53
2.1.1 国家法律法规、条例和 地方政策、规划	21	4.1.1 基本热力循环的热经济性	53
2.1.2 环评报告编制的规范和技术导则 ..	21	4.1.2 典型不可逆过程的做功损失	54
2.1.3 建设项目的有关批文	22	4.2 凝汽式热电厂的热经济指标	54
2.1.4 项目可行性研究	22	4.2.1 汽轮发电机组的热经济指标	54
2.1.5 环评工作委托书及环评资料	22	4.2.2 锅炉设备的热经济指标	55
2.1.6 环境保护目标	22	4.2.3 管道效率	55
2.1.7 环境评价等级、范围及评价标准 ..	22	4.2.4 全厂热经济指标	55
2.1.8 能源项目的环保状况	23	4.2.5 发电厂的技术经济比较	55
2.1.9 主要污染物排放总量分析	23	4.3 联合发电循环	56
2.1.10 工程项目对区域环境的影响	23	4.3.1 高效低污染的超临界凝汽式发电 ..	56
2.1.11 评价方法简介	24	4.3.2 大型循环流化床电站	56
2.2 环境空气影响预测及评价	24	4.3.3 燃气轮机发电	57
2.2.1 各种污染物排放计算	24	4.3.4 燃煤燃气-蒸汽联合循环	59
2.2.2 污染防治措施可行性论证	25	4.3.5 燃料电池清洁发电	65
2.2.3 环境风险评价	25	第 5 章 工业企业自备电厂及其蒸汽系统	68
2.3 环境评价案例	25	5.1 工业企业的供汽参数	69
2.2.1 环评依据	25	5.1.1 过程耗汽	69
2.3.2 环境敏感区域和保护对象	26	5.1.2 参数选择	70
2.3.3 环评标准	26	5.2 动力机械的驱动方式	71
2.3.4 环境评价因子	26	5.2.1 泵和压缩机的驱动	71
2.3.5 工程概况	26	5.2.2 汽动泵的选择	71
		5.3 蒸汽平衡和平衡追踪	72
		5.3.1 蒸汽平衡	72

5.3.2 设计基础检验	73	6.1.1 电厂投资要素	81
5.3.3 典型的蒸汽平衡工况	74	6.1.2 一次投资	82
5.3.4 复位时的母管控制	75	6.2 影响电厂投资的主要因子	83
5.3.5 蒸汽平衡追踪	75	6.2.1 机组容量	83
5.3.6 商务投资	75	6.2.2 燃料种类	84
5.4 蒸汽管网	76	6.2.3 电厂复杂程度	84
5.4.1 设计考虑	76	6.2.4 蒸汽参数对汽轮机投资的影响	85
5.4.2 蒸汽压力分级	77	6.2.5 压头对水轮机投资的影响	85
5.4.3 蒸汽系统控制总述	78	6.2.6 冷却塔	86
5.4.4 管网大小	78	6.2.7 建筑时间	86
5.4.5 凝结水收集	78	6.3 建筑期间的主要投资项目和资金追加	87
5.4.6 替代蒸汽源	79	6.3.1 主要一次投资项目的相对份额	87
5.4.7 动态模拟	80	6.3.2 每周工作时间延长的影响	87
第6章 火电厂投资——评估和使用	81	6.3.3 新型电厂的一次投资	87
6.1 火力发电厂的投资要素	81	6.3.4 某电厂扩建工程投资简介	89

第2篇 新能源概论

第7章 绪论	94	9.4 地热能	150
7.1 能源危机导致常规能源变革	94	9.4.1 地热资源分类	151
7.2 中国清洁能源发展现状	95	9.4.2 中国地热资源	152
第8章 洁净煤技术及煤的清洁燃料生产	97	9.4.3 中国地热资源的开发	153
8.1 洁净煤技术及煤的清洁燃料生产	97	9.4.4 地热发电技术	154
8.1.1 煤炭洗选与加工	97	9.4.5 地热井	159
8.1.2 煤炭转换	97	9.4.6 世界地热发电现状与发展前景	160
8.1.3 洁净煤发电技术	98	9.5 海洋能及其发电技术	161
8.2 煤基生产清洁燃料	100	9.5.1 潮汐能	161
8.2.1 煤直接液化制燃料	100	9.5.2 波浪能	162
8.2.2 煤间接液化制燃料	100	9.5.3 冷热交替海洋温差热能	163
8.3 未来煤炭能源系统	101	9.5.4 海水盐差能	165
8.3.1 煤基多联产能源系统	101	9.6 风能及风力发电	165
8.3.2 美国“前景21”多联产系统	102	9.6.1 风的产生与风能定义	166
8.3.3 Shell合成气园新概念	102	9.6.2 风能特征及风能估算	166
第9章 新能源与可再生能源	104	9.6.3 风力发电	167
9.1 新能源和可再生能源含义和分类	104	9.6.4 中国的风能资源	171
9.2 太阳能及其利用	104	9.6.5 风能政策设计和主要风能政策	174
9.2.1 概述	104	9.7 氢能与燃料电池	178
9.2.2 太阳能基本特性	105	9.7.1 氢的基本性质及氢能特点	178
9.2.3 太阳能利用分类	106	9.7.2 氢的制取	180
9.2.4 太阳能热发电	106	9.7.3 氢的储存	182
9.2.5 太阳能制冷、空调动力系统	114	9.7.4 氢能利用	184
9.2.6 太阳能光伏发电	116	9.7.5 氢安全	185
9.3 生物质能及其利用	119	9.8 燃料电池概述	186
9.3.1 生物质能含义	119	9.8.1 燃料电池的主要特点	186
9.3.2 植物能源	121	9.8.2 燃料电池的分类	187
9.3.3 石油植物	123	9.8.3 燃料电池应用	189
9.3.4 生物质转化的能源形式	124	9.8.4 燃料电池的发展前景	191
9.3.5 生物质能的转化技术	130	9.9 核能	192

9.9.1	概述	192	10.2.1	政策决策原则	207
9.9.2	核电站	193	10.2.2	政策决策分析步骤	207
9.9.3	核反应堆	194	10.2.3	政策决策的分析方法	208
9.9.4	核供热技术	198	10.3	各类政策在清洁能源行动中的应用	211
9.9.5	核废弃物处理与核安全	199	10.3.1	在能源替代方面的应用	211
9.9.6	核能利用的未来	201	10.3.2	在热电联产、集中供热方面的应用	211
9.10	可燃冰	201	10.3.3	在洁净煤技术推广中的应用	211
9.10.1	可燃冰的形成	201	10.3.4	在可再生能源方面的应用	214
9.10.2	可燃冰的分布	201	10.3.5	试点城市的政策类型汇总	214
9.10.3	可燃冰的性质	202	10.4	政策实施效果和评价	214
9.10.4	可燃冰开采	202	10.4.1	衡量标准	214
第10章	清洁能源促进政策	204	10.4.2	政策实施效果评价	215
10.1	清洁能源政策类型和特点	204	附录		220
10.1.1	政策和清洁能源政策	204	附录1	中国能源中长期发展规划	220
10.1.2	政策的法律基础	204	附录2	节能减排专项行动	221
10.1.3	政策的基本类型和特点	205	附录3	有关名词解释	223
10.2	清洁能源政策的决策步骤和分析方法	207	参考文献		225

第 1 篇

常规能源概论

目录 1.1

1.1.1 常规能源的概念及分类

1.1.2 常规能源的分布

1.1.3 常规能源的利用

1.1.4 常规能源的展望

1.1.5 常规能源的节约

1.1.6 常规能源的运输

1.1.7 常规能源的储存

1.1.8 常规能源的转化

1.1.9 常规能源的污染

1.1.10 常规能源的可持续发展

1.1.11 常规能源的法律法规

1.1.12 常规能源的科技创新

1.1.13 常规能源的国际合作

1.1.14 常规能源的公众参与

1.1.15 常规能源的宣传教育

1.1.16 常规能源的应急管理

1.1.17 常规能源的信息化建设

1.1.18 常规能源的标准化建设

1.1.19 常规能源的知识产权保护

1.1.20 常规能源的投融资机制

1.1.21 常规能源的保险机制

1.1.22 常规能源的仲裁机制

1.1.23 常规能源的信用体系建设

1.1.24 常规能源的信息公开

1.1.25 常规能源的统计监测

1.1.26 常规能源的审计监督

1.1.27 常规能源的绩效评价

1.1.28 常规能源的问责机制

1.1.29 常规能源的廉政建设

1.1.30 常规能源的纪律处分

1.1.31 常规能源的信访工作

1.1.32 常规能源的舆情应对

1.1.33 常规能源的突发事件

1.1.34 常规能源的危机公关

1.1.35 常规能源的声誉管理

1.1.36 常规能源的品牌建设

1.1.37 常规能源的文化建设

1.1.38 常规能源的精神文明建设

1.1.39 常规能源的生态文明建设

1.1.40 常规能源的法治建设

1.1.41 常规能源的德治建设

1.1.42 常规能源的礼治建设

1.1.43 常规能源的智治建设

1.1.44 常规能源的法治、德治、礼治、智治相结合

1.1.45 常规能源的治理体系和治理能力现代化

1.1.46 常规能源的治理效能提升

1.1.47 常规能源的治理主体多元化

1.1.48 常规能源的治理手段多样化

1.1.49 常规能源的治理过程透明化

1.1.50 常规能源的治理结果可预期

1.1.51 常规能源的治理制度健全

1.1.52 常规能源的治理机制完善

1.1.53 常规能源的治理流程优化

1.1.54 常规能源的治理效率提高

1.1.55 常规能源的治理质量提升

1.1.56 常规能源的治理满意度提高

1.1.57 常规能源的治理公信力增强

1.1.58 常规能源的治理权威树立

1.1.59 常规能源的治理影响力扩大

1.1.60 常规能源的治理示范作用发挥

1.1.61 常规能源的治理经验总结

1.1.62 常规能源的治理成果巩固

1.1.63 常规能源的治理长效机制建立

1.1.64 常规能源的治理持续健康发展

1.1.65 常规能源的治理实现高质量发展

1.1.66 常规能源的治理实现高水平现代化

1.1.67 常规能源的治理实现全面建设社会主义现代化国家

1.1.68 常规能源的治理实现中华民族伟大复兴

1.1.69 常规能源的治理实现中国梦

1.1.70 常规能源的治理实现人类命运共同体

1.1.71 常规能源的治理实现世界大同

1.1.72 常规能源的治理实现大同世界

1.1.73 常规能源的治理实现天下大同

1.1.74 常规能源的治理实现大同理想

1.1.75 常规能源的治理实现大同境界

1.1.76 常规能源的治理实现大同境界

1.1.77 常规能源的治理实现大同境界

1.1.78 常规能源的治理实现大同境界

1.1.79 常规能源的治理实现大同境界

1.1.80 常规能源的治理实现大同境界

第1章 常规能源和中国的能源工业

广义而言，任何比较集中而又容易转化的含能物质都可以称作能源。对于工业过程，能源可以描述成：“比较集中的含能体或能量过程”，可以直接或经过转换提供的光、热、电、动力等任何形式能量的载能体资源。

通常将能源分成三类。第一类来自太阳能。除了直接利用阳光能量之外，煤炭、石油、天然气等化石燃料也是太阳能的聚集，此外还有生物质能、流水能、风能、海洋能、雷电等也都是由于太阳能经过某种方式转换形成的。第二类是地球自身蕴藏的能量，主要指地热、核燃料，此外还包括地震、火山喷发、温泉等自然呈现的能量。第三类是地球与其他天体相互作用形成的能量，主要指潮汐能。

能源还可按照相对比较的方法分类，如分成一次能源和二次能源、可再生和不可再生能源、常规能源与新能源、燃料能源与非燃料能源等。

常规能源主要指工业过程和日常生活中广泛使用的能源。这些能源的存在形式不一，有固体、液体和气体等形式。固体燃料有煤、油页岩、草炭、植物等，液体燃料以各种油类为主，如汽油、柴油、煤油以及重油和渣油等，气体燃料有天然气、人造气（高炉煤气、焦炉煤气、液化石油气）等。这些能源多数属于一次性消费能源，具有不可再生性，是地球形成后为人类累积存留下来的资源。

1.1 煤炭

煤炭是一种由多种有机物和无机物混合组成的复杂的碳氢化合物固体燃料，是由远古时代的植物遗体在地表湖泊或海湾环境中经历复杂的生物化学变化逐渐形成的。随着地壳的运动，植物遗体被埋入地下，在高温和高压的作用下，原来植物中的纤维素、木质素经过脱水腐蚀，含氧不断减少，含碳不断增加，逐渐变成化学稳定性强、含碳量高的固体碳氢化合物燃料——煤炭。

煤炭本身的结构十分复杂，由于自身的复杂性，限制了科学仪器在分析煤结构中的应用，常规仪器只能获得很少的信息。随着计算机技术的发展，煤结构研究已经从平面发展到立体，又发展出缔合模型、主客体结构模型、两相模型等模型。由于煤种的多样性和成因、碳化程度等多种原因，建立普适的煤结构模型难度较大。

1.1.1 煤的成分和煤质指标

1.1.1.1 煤的成分

煤是远古植物遗体经过碳化而形成，其形成过程不仅植物遗体变成了煤，植物遗体之间的地质成分也随着进入煤基体，这就使煤炭成分变得复杂起来。作为燃料，人们关心煤的成分主要从燃烧和环境保护角度出发。哪些成分可以燃烧？哪些成分燃烧或经历燃烧过程后会危害环境？从这些角度出发，将煤的成分分为碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分。除了上面提到的元素外，所有寄身煤炭中的元素或化合物都归类到灰分中去。

① 碳。碳是煤炭中有机成分的主导成分和最主要的可燃成分。一般含碳量越高，煤炭

的热值就越高。碳完全燃烧生成二氧化碳时,放出 32.866MJ/kg 热量,不完全燃烧生成一氧化碳时,仅放出 9.27MJ/kg 热量。纯碳的着火和燃烧都比较困难,含碳量高的煤种要有针对性地设计燃烧室。

② 氢。是煤中发热量最高的元素,燃烧热值可达到 120.37MJ/kg。随着煤的炭化程度加深,氢含量减少。

③ 氧。虽然氧不是可燃元素,但氧可以参加燃烧。与氢一样,随着炭化程度加深氧含量减少。

④ 氮。主要来自成煤植物,燃烧时常呈游离状态逸出,不产生热量。煤中的氮氧化后形成的氮氧化物是重要的大气污染物。

⑤ 硫。煤中的主要有害物质。煤中的硫分为无机硫和有机硫,前者以矿物杂质形式存在于煤中,可分为硫化物硫和硫酸盐硫。后者是直接结合于有机母体中的硫,主要是硫醇、硫化物(烷基、烷基-烷环基、环化合物)和二硫化物,以及后来发现的单质硫。

煤中的硫酸盐硫主要是石膏、绿矾等物质,在热解过程中失去结晶水,并被热解产生的氢还原成亚硫酸盐或硫化物,硫酸盐并不析出,也不形成污染环境的气态物质,而是变成灰分的一部分。有机硫和硫化物可以燃烧,燃烧放出的热量为 9100kJ/kg。

煤成分的测定方法如下。

碳含量和氢含量通常在同一实验操作中测定。将盛有煤样的瓷舟放入燃烧管中,通入氧气,在 800℃ 温度下充分燃烧。碳和氢分别生成二氧化碳和水。用无水氯化钙或过氯酸镁在吸收管中首先吸收水分,再以装有碱石棉或钠石灰的吸收管吸收二氧化碳,根据吸收管的增重计算出煤中碳和氢的含量。

直接测量煤中含氧量的方法为数甚少,比较成熟的方法是舒兹法。有机物在纯氮气气氛中于 1120℃ 下高温裂解,纯碳与析出裂解产物中有机结合态的氧和部分可能存在于水中的氧反应生成 CO,CO 同五氧化二碘定量反应,析出当量的碘,此时 CO 转化成 CO₂,根据析出碘量或生成的 CO₂ 量即可计算出试样中原有的氧含量。

硫分为有机硫、无机硫和硫化物硫,有时也存在微量的硫元素,这些形态硫的总和称为全硫。全硫的测定有艾氏法[各国通用标准方法,将艾氏试剂(碳酸钠和氧化镁 1:2 混合)与煤样均匀混合,在马弗炉中加热缓慢燃烧,煤中的硫全部转化为硫酸钠和硫酸镁]、高温燃烧法(高温氧气流中燃烧,煤中的硫全部氧化成二氧化硫,用过氧化氢吸收)和弹筒燃烧法三种。

煤中水分测定采用干燥失重法、直接测量法、直接容量法和真空或氮气干燥法 4 种,国内多采用干燥失重法。

煤中的灰分测定通常在 (815±10)℃ 温度下完全燃烧,称重残留物质作为灰分。

挥发分测定:1g 空气干燥基煤样放入 900℃ 高温炉中隔绝空气加热 7min,以煤样在 (900±10)℃ 的失重百分数减去 M_{ad} 作为空气干燥煤样的挥发分。

煤的发热量通常采用氧弹量热仪测量。燃烧工程中使用的低位发热量,是氧弹热量减去测定过程中的酸生成热和点火热以及煤中水分的气化潜热后的、针对燃烧装置的实际发热量。

1.1.1.2 常用煤质指标

① 水分。不参加燃烧。分为外部水分、内部水分和化合水分三部分。外部水分取决于环境以及煤本身对外部水的容纳能力;在 102~105℃ 条件下将空气干燥煤样烘干,失去的水分就是内部水分,煤中的氢氧化生成的水叫化合水分。

② 灰分。煤完全燃烧后的固体剩余物。来自煤本身杂质、成煤过程的外来物、开采和运输过程的掺杂物。

③ 挥发分。在隔绝空气条件下,将煤加热到 850℃ 左右,煤中有机质分解出来的液体和气体产物。炭化程度越高,挥发分含量越少。

④ 发热量。单位质量煤完全燃烧放出的热量。煤中可燃成分主要是碳、氢和硫。因此，煤的发热量可以通过计算获得。但由于煤质的复杂性，计算得到发热量与该煤种燃烧放热有差别，工业应用的发热量主要来自实验测定值。煤的热值可以采用仪器测量，如采用氧弹量热仪，测得的热量叫做氧弹热量。由于测量过程中有引火物热量、酸生成热等因素，煤的实际发热量是换算出来的，叫做高位发热量。在工业燃烧时，煤的热量并不是全部用于工业目的，如燃烧过程中产生的烟气排到大气中都具有比较高的温度，水在烟气中只能以蒸汽形式随烟气排掉，水蒸气带走的热量是工业炉窑等装置无法获得或不能回收的。因此，在工业炉窑装置进行热力计算时所使用的燃料发热量是高位发热量中扣除水蒸气携带热量后的热值，此时的热量就是低位发热量。

1.1.1.3 煤成分的表达式

煤由碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分组成，所有成分之和应为 100%。但由于使用目的不同，煤成分分析可以分为元素分析和工业分析。前者要在专业实验室中获得，后者在一般的工业锅炉用户和几乎所有电厂都能进行。

(1) 煤的元素分析 只考虑煤中可燃质，不计入灰分和水分的质量，形成的百分数叫做干燥无灰基成分 (dry ash free)；不计入水分质量形成的百分数叫做干燥基成分 (dry)；考虑水分质量，但为了消除外部水分的影响，将煤样在 20℃ 以上温度、60% 相对湿度条件下放置，使其失去外部水分所形成的百分数叫做空气干燥基成分 (air dry)；在进入燃烧室之前取样获得的煤分析成分叫做收到基成分 (as received)。形成的百分数分别记作：

$$\text{收到基 } C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\%$$

$$\text{空气干燥基 } C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\%$$

$$\text{干燥基 } C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\%$$

$$\text{干燥无灰基 } C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\%$$

式中，C、H、O、N、S 分别表示煤中相应的化学元素；A 代表灰分；M 代表水分；角标是不同基成分英文词组的缩写 (图 1-1)。

全水分	表面水分					
	内在水分	空气干燥基水分				
矿物质	灰分					
	可挥发矿物质	挥发分	干燥无灰基 daf	干燥基 d	空气干燥基 ad	收到基 ar
纯煤	可挥发有机质					
	固定碳					

图 1-1 各种基准之间的关系

(2) 煤的工业分析 煤的工业分析用简单的电炉和天平就可以获得，主要是测量燃烧过程的重量损失。煤热处理过程中，首先失去水分，然后失去挥发分和固定碳，剩下的就是灰分。按照元素分析的表达式，工业分析表示如下。

$$\text{收到基 } M_{ar} + V_{ar} + F_{ar} + C_{ar} + A_{ar} = 100\%$$

$$\text{空气干燥基 } M_{ad} + V_{ad} + F_{ad} + C_{ad} + A_{ad} = 100\%$$

$$\text{干燥基 } V_d + F_d + C_d + A_d = 100\%$$

$$\text{干燥无灰基 } V_{daf} + FC_{daf} = 100\%$$

根据上述百分数的定义，可以将一种百分数换算到另一种百分数，很多专业书籍中都列出了换算公式，读者也可以简单地根据百分数关系推导出来。

1.1.2 煤的分类

煤的分类方法很多,不同国家和不同行业都有分类。中国煤炭分类标准中将煤分为无烟煤(分一、二、三号)、贫煤、贫瘦煤、瘦煤、焦煤、肥煤、气肥煤、气煤和中黏煤(表 1-1)。中国动力用煤分为无烟煤、贫煤、烟煤(有高低挥发分之分)和褐煤。美国国家标准 ASTM 将煤分为长焰煤、半烟煤、低挥发分烟煤、中挥发分烟煤、高挥发分烟煤和无烟煤。

表 1-1 中国煤炭分类的完整体系

项 目	技术分类/商业编码	科学/成因分类
国家标准	技术分类:GB 5751—86,中国煤炭分类 商业编码:GB/T 16772—1997,中国煤炭编码系统	GB/T 17607—1998,中国煤层煤分类
应用范围	① 煤加工(筛分煤、洗选煤、各粒级煤) ② 非单一煤层煤或配煤 ③ 商品煤 ④ 指导煤炭利用	① 煤视为有机沉积岩(显微组分和矿物质) ② 煤层煤 ③ 国内外煤炭资源储量统一计算基础
目的	① 技术分类:以利用为目的(燃烧、转化) ② 商业编码:国内贸易与进出口贸易 ③ 煤利用过程较详细的性质与行为特征 ④ 对商品煤给出质量评价或类别	① 科学/成因为目的 ② 计算资源量与储量的统一基础 ③ 统一不同国家资源量、储量的统计与可靠计算 ④ 对煤层煤质量评价
方法	① 人为制定分类编码系统 ② 数码或商业类别(牌号) ③ 有限的参数,有时是不分类别 ④ 基于煤的化学性质和部分煤岩特征	① 自然性质 ② 定性描述类别 ③ 有类别界限 ④ 分类参数主要基于煤岩特征

1.1.3 中国的煤炭资源

中国煤炭资源主要形成于古生代的石炭纪、二叠纪,中生代的侏罗纪和新生代的第三纪,大体上可以划分为近海型煤系和内陆型煤系。

中国先后组织了三次全国煤田预测,20 世纪 90 年代已经完成资料。截至 1992 年,中国已经发现煤炭资源 1.02Tt (10^{12} t),其构成为:

$$\begin{array}{l}
 \text{已发现煤炭资源 } 1.02\text{Tt} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{已查证资源 } 0.68\text{Tt} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{储量 } 0.44\text{Tt} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{生产和在建矿井所占储量 } 0.19\text{Tt} \\
 \text{未被占用储量 } 0.25\text{Tt}
 \end{array} \right. \\
 \text{普查资源量 } 0.24\text{Tt}
 \end{array} \right. \\
 \text{待查资源量 } 0.34\text{Tt}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

中国煤炭资源的自然分布有以下几个特征。一是侏罗纪成煤量大,占 39.6%,依次为二叠纪(北方 38%)、白垩纪(12.2%)、二叠纪(南方 7.5%)、第三纪(2.3%)以及三叠纪(0.4%);二是煤炭资源比较集中,重要的分布区包括山西、陕西、宁夏、内蒙古、河南和塔里木河以北以及川南、黔西、滇东;三是煤种分布齐全,但数量和分布不均衡,褐煤占 12.7%;硬煤中,低变质烟煤占 42.4%,中变质烟煤(炼焦煤)占 27.6%。目前的情况是,预测的资源量多,经过勘查的资源量少,可供开发利用的更少。图 1-2 是中国煤炭资源分布示意图。

近海型煤系的沉积区往往是滨海平原或海边的潟湖、海湾以及浅海,是一种海陆交替相煤系,往往含有黄铁矿、白铁矿结核,因此含硫量较高,通常为 2.5%~4%,有时高达 10%。与海水进入沼泽有关,海水中的硫酸盐与植物遗体及分解产物接触,被还原形成硫化铁。我国两个重要的近海型煤系有华北石炭二叠纪煤系和华南晚二叠纪煤系。

内陆型煤系完全在大陆上,常见的有山间盆地、内陆盆地及山前盆地。煤系沉积过程中,未发生海水进入,全部都是陆相沉积物。陆相沉积物一般较厚,结构也复杂,煤层的水平方向稳定性差。

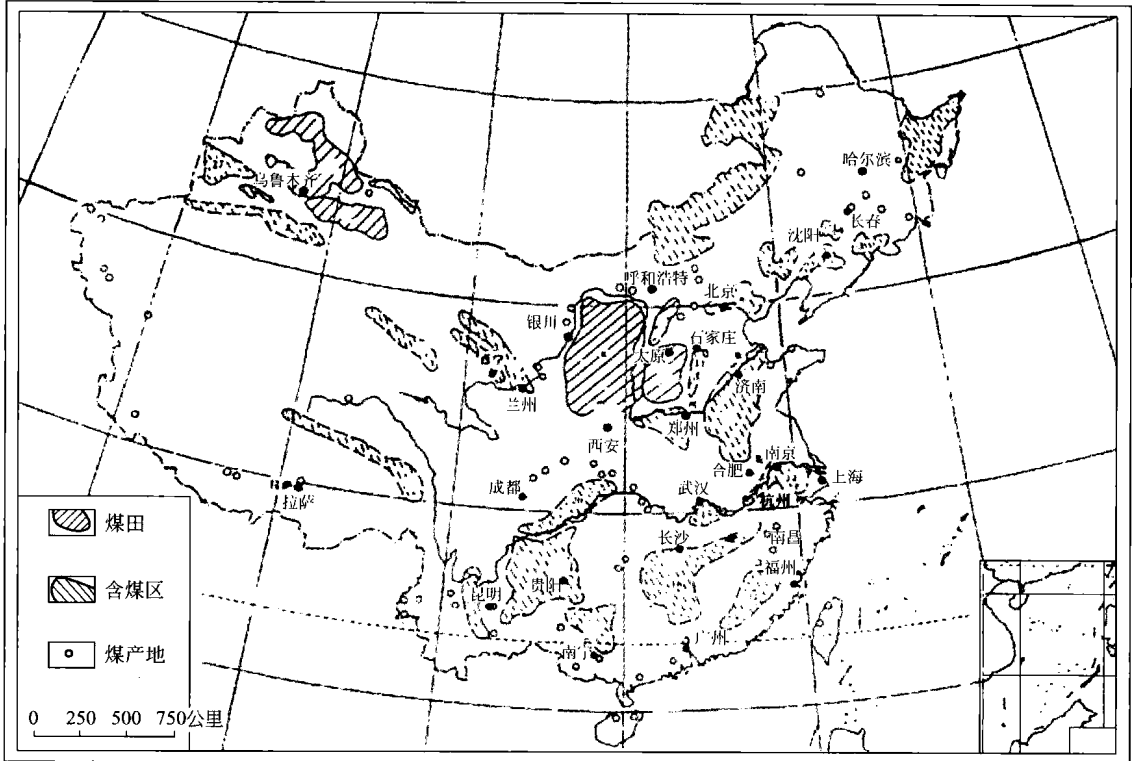


图 1-2 中国煤炭资源分布示意图

由于煤燃烧放出的有害气体中二氧化硫对自然和人工物体的破坏最大，因而煤中所含的硫备受关注。中国不同地域煤炭含有的硫，存在方式和成分有很大区别，分别叙述如下。

① 东北和内蒙古区域：含硫量普遍低于 1%，从北向南逐渐升高，个别煤田超过 2%。

② 华北煤田：上部煤田含硫多在 0.5%~1.5% 左右，下部煤层含硫多在 2%~4% 以上。

③ 西北煤田低硫煤多，但陕西省煤田含硫量平均为 2.84%。

④ 华东煤田高硫煤比例较大，除安徽淮南、淮北煤田外其他各省份含硫高于 1%，山东几个矿的含硫较高，而下部煤层高硫煤产量逐年增长。

表 1-2 中国高硫煤矿区硫的赋存形式

项 目	煤层煤样/%					商品煤样/%				
	$S_{t,d}$	$S_{p,d}$	$S_{s,d}$	$S_{o,d}$	有机硫占有率/%	$S_{t,d}$	$S_{p,d}$	$S_{s,d}$	$S_{o,d}$	有机硫占有率/%
全国	2.76	1.61	0.11	1.04	37.7	2.76	1.47	0.09	1.20	43.5
动力煤	2.76	1.69	0.13	0.94	34.1	2.66	1.87	0.11	0.68	25.6
炼焦煤	2.75	1.54	0.09	1.12	40.7	—	1.34	0.07	—	—
华东	2.16	1.09	1.09	0.98	45.4	2.65	1.21	0.09	1.35	50.9
中南	3.20	1.62	0.12	1.46	45.6	3.42	1.53	0.07	1.82	53.2
西南	3.54	2.69	0.11	0.74	20.9	3.48	2.63	0.08	0.77	22.1
华北	2.50	1.39	0.13	0.98	39.2	2.30	1.03	0.08	1.19	51.7
西北	2.82	1.14	0.09	1.59	56.4	2.36	1.04	0.07	1.25	53.0
东北	2.70	1.91	0.17	0.62	23.0	2.66	1.67	0.30	0.69	25.9

⑤ 西南煤田煤中平均硫分在各大区中最高，平均为 2.13%。高硫煤成煤时代多为二叠系上统乐平（龙潭）煤系，属海陆交互相沉积，贵州六枝和重庆等矿区含硫量最高。但各矿区煤中硫的赋存状态及脱硫可选性又很大不同。

全国 97 个国有重点煤矿中，平均含硫超过 2% 的有 28 个矿务局，主要集中在西南。从各地高硫煤的赋存形式看，黄铁矿硫 S_p 占 58%，有机硫 S_o 占 38%，硫酸盐硫 S_s 仅占 4%。西南地区高硫煤中黄铁矿硫高达 75%。中国高硫煤矿区硫的赋存形式见表 1-2。

全国 2093 个煤层取样，按不同煤炭类别的统计结果显示，硫分总的趋势是低碳化程度煤的硫分低。最低的是长焰煤，平均 0.74%；最高的是肥煤，平均 2.33%。我国多数煤种除长焰煤、气煤和不黏结煤外，平均含硫量超过 1%。煤中硫的分类如图 1-3 所示。

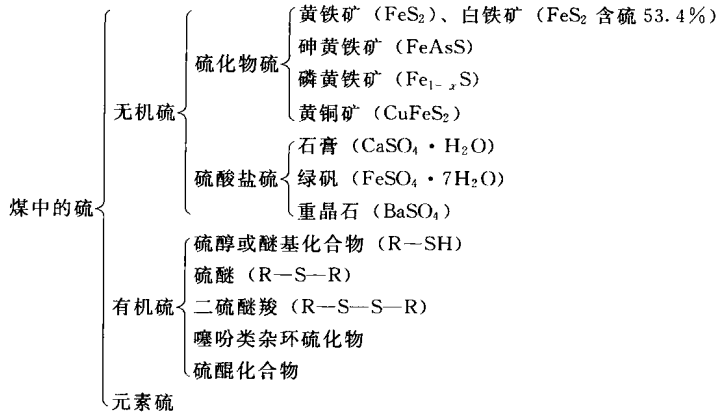


图 1-3 煤中硫的分类

煤燃烧过程放出的有害物质主要有颗粒物、硫氧化物、氮氧化物和碳氧化物。这些物质不仅破坏环境，对人体健康也有很大甚至是破坏性影响。表 1-3~表 1-6 是不同大气污染物的危害。

① 颗粒物的危害：颗粒物包括各种灰尘、烟雾、烟尘、液体雾滴和云雾等，粒径大到 200 μm ，小到 0.1 μm 以下。可以分为飘尘和降尘两类。当颗粒直径小于 10 μm ，形成固-液-气混合的气溶胶，随着气流一起运动，不会在重力作用下沉降，所以叫做飘尘。

表 1-3 不同飘尘浓度对人体健康的影响

飘尘含量/ $\times 10^{-6}$	影 响
100(全年平均值)	慢性支气管炎等非传染性呼吸道疾病增多,幼儿气道不顺,呼吸紧张
150(日平均值)	老弱病患者死亡,视程小于 8km,飞机飞行困难
300(小时平均值)	死亡率增加

② 硫氧化物的危害：硫氧化物主要是二氧化硫，一种无色有臭味的气体。二氧化硫在大气中不是稳定气体，在大气中发生光化学反应和催化反应形成硫酸和硫酸盐气溶胶。二氧化硫对人体的危害更显示在与飘尘结合的共同作用，毒性增加许多倍。

表 1-4 二氧化硫对人体健康的影响

SO ₂ 含量/ $\times 10^{-6}$	对人体健康的危害	SO ₂ 含量/ $\times 10^{-6}$	对人体健康的危害
1~3	开始感到胸部有压迫感,嗅到臭味	20	刺激眼睛的最低浓度
5	是 8h 最高允许浓度	400~500	人直接感到呼吸困难与生命危险
6~12	对鼻和咽喉产生直接刺激,发生咳嗽	1350	实验表明,10min 白鼠死亡

③ 氮氧化合物的危害：氮氧化物包括一氧化氮、二氧化氮和氧化亚氮（ N_2O ，亦称笑气），通常用 NO_x 表示。其中 95% 是一氧化氮，一氧化氮无色无臭，浓度大时，毒性甚大。二氧化氮为红棕色有毒恶臭气体。

表 1-5 NO_x 对人体的危害

含量/ $\times 10^{-6}$	影 响	含量/ $\times 10^{-6}$	影 响
1	嗅到臭味	80	3~5min 引起胸痛
5	闻到强烈臭味	100~150	30~60min 引起人肺水肿而死亡
10~15	眼、鼻、呼吸道受到刺激	200 以上	瞬时死亡
50	1min 内人体呼吸异常		

④ 碳氧化合物的危害：主要是一氧化碳和二氧化碳。一氧化碳是无色无臭气体，主要是来自燃料的不完全燃烧，在大气中可以停留几个月时间，浓度大时可以使人窒息。

表 1-6 CO 对人体健康的影响

CO 含量/ 10^{-6}	停留时间/h	对人体健康的影响
5~30		对呼吸道疾病患者有影响
30	≥ 8	视觉及神经机能出现障碍，血液中 Co-Hb=5%
40	8	气喘
70~100	1	中枢神经受影响
250	2~4	头重，头痛，血液中 Co-Hb=40%
500	2~4	剧烈心痛，恶心，无力，眼花，虚脱
1000	2~3	脉搏加速，痉挛，昏迷，潮式呼吸
2000	1~2	死亡
3000	0.5	死亡

二氧化碳是无毒气体，但浓度过高会造成氧气减少，引起人体不适。二氧化碳是重要的温室气体，已经引起联合国高度重视。

⑤ 煤中微量元素的危害：煤中含有 60 多种微量元素，有些如 Ge、Ga 和 V 等可看作有益伴生矿；有些则是有害元素或潜在有害元素，如 As、F、Cr 和 Hg，这些微量元素在燃烧、运输、加工和堆放过程中以各种形式进入大气、土壤和水域造成污染。据报道煤中有害元素共 22 种：Ag、As、Ba、Be、Cd、Co、Cl、Cu、Cr、F、Hg、Mn、Mo、Ni、Pb、Se、Sb、Th、Tl、U、V、Zn，其中 Be、Cd、Hg、Pb、Tl 为有毒元素，As、Be、Cd、Cr、Ni 和 Pb 为致癌元素。我国煤中某些有害元素含量见表 1-7。

表 1-7 我国煤中某些有害元素含量（中国/世界）

元素	含量/ $(\mu\text{g/g})$	算数平均值/ $(\mu\text{g/g})$	几何平均值/ $(\mu\text{g/g})$	样品数
汞	(0.003~10.5)/(0.02~1.0)	0.158/0.012		990
硒	(0.12~56.7)/(0.2~10)	6.22/3.0	3.64	118
镍	(0.5~50)/(15~20)		15.22	

微量元素按转化行为大体上可分为三类。第一类是燃烧后在底灰和飞灰中均量分布。第二类是明显地向飞灰中富集，底灰中含量少。第三类元素具有挥发性，甚至在飞灰中也不会富集，全部或大部分以气态形式进入大气。微量元素或其氧化物在高温下的行为与沸点高低密切相关。

燃烧形成的有害物质不仅对人体健康有很大危害，对森林、农作物、建筑物等都有严重的危害。对农作物的危害主要通过叶背面的气孔进入植物体，破坏叶绿素，使组织脱水坏死，阻碍新陈代谢，抑制植物生长。危害植物的物质主要是二氧化硫、氟化物和光化学烟雾，危害可以分为急性、慢性和不可见三类。

1.1.4 工业用户对煤质的要求和主要煤质指标

1.1.4.1 火力发电厂固态排渣煤粉炉的煤质要求

固态排渣煤粉炉可以使用无烟煤、烟煤（贫煤）和褐煤。对煤质的要求见表 1-8～表 1-11。

表 1-8 发电锅炉对挥发分的要求

挥发分 $V_{daf}/\%$	热值 $Q_{ar.net}/(kJ/kg)$	挥发分 $V_{daf}/\%$	热值 $Q_{ar.net}/(kJ/kg)$
$V_1 > 6.5 \sim 10.0$	> 20930	$V_4 > 27.0 \sim 40.0$	> 15488.2
$V_2 > 10.0 \sim 19.0$	> 18418.4	$V_5 > 40.0$	> 11720.8
$V_3 > 19.0 \sim 27.0$	> 16325.4		

表 1-9 锅炉对灰分和硫分的要求

灰分 A_d	$S_{i,d}/\%$
$A_1 \leq 24$	$A_1 \leq 1.0$
$A_2 < 24 \sim 34$	$S_2 > 1.0 \sim 3.0$
$A_3 > 34 \sim 46$	

表 1-10 锅炉对水分的要求

$M/\%$		V_{daf}	$M/\%$		V_{daf}
M_1	$M_1 \leq 8$ $M_2 > 8 \sim 12$	(≤ 40)	M_1	$M_1 \leq 22$ $M_2 > 22 \sim 40$	(> 40)

表 1-11 锅炉对煤灰渣熔融性要求

软化温度 $ST/^\circ C$	$Q_{ar.net}/(kJ/kg)$
> 1350	> 12558
不限	≤ 12558

1.1.4.2 冶金炼焦的煤质要求

适用于炼制高炉冶金焦用精煤，可作为煤炭洗选加工、炼焦配煤的依据。冶金炼焦对煤质的要求见表 1-12。

表 1-12 冶金炼焦对煤质的要求

名称	技术要求	试验方法
灰分 $A_d/\%$	一级 ≤ 10.00 二级 $10.01 \sim 12.5$	GB 212
全硫 $S_{i,d}/\%$	一级 ≤ 1.50 二级 $1.51 \sim 2.50$	GB 214
全水分 $M_t/\%$	≤ 12.0	GB 211

1.1.4.3 铸造焦用煤质要求

适用于铸造焦用精煤，可作为煤炭分类依据。铸造焦用煤质要求见表 1-13。

表 1-13 铸造焦用煤质要求

名称	灰分 $A_d/\%$	全硫 $S_{i,d}/\%$	全水分 $M_t/\%$
技术要求	≤ 10.00	≤ 1.00 $10.1 \sim 1.50$	≤ 12.0
试验方法	GB 212	GB 214	GB 211

1.1.4.4 常用固定床煤气发生炉煤质要求

适用于常用固定床煤气发生炉，也可作为制定矿区工业用煤质量标准、煤炭资源评价、煤炭分配、煤田开发和煤炭加工利用规划的依据。常用固定床煤气发生炉煤质要求见表 1-14。

1.1.4.5 合成氨用煤质要求

适用于直径 2.74~3.60m 的固定床气化炉的中型合成氨厂的原料用煤煤质要求见表 1-15。

1.1.4.6 高炉顶喷用无烟煤的煤质标准

适用于各种类型高炉喷吹用无烟煤煤质要求见表 1-16。

表 1-14 常用固定床煤气发生炉煤质要求

名 称	技 术 要 求	试 验 方 法
粒度分级/mm	烟煤:13~25;25~50;50~100;25~80 无烟煤:6~13;13~25;25~50	GB 189
块煤限下率	50~100mm,粒度级≤15% 25~50mm 和 25~80mm,粒度级≤18%	MT 1
含矸率	一级<2.0%;二级 2.0%~3.0%	
灰分 A_d	一级 A_d ≤18.0%;二级 A_d >18.0%~24%	GB 212
全硫 $S_{t,d}$	$S_{t,d}$ ≤2.0%	GB 214
煤灰软化温度	ST≥1250℃(但当 A_d ≤18.0%,ST≤1150℃)	GB 219
热稳定性	TS ₊₆ >60.0%	GB 1573
抗碎强度(>25mm)	>60.0%	GB 7561
胶质层厚度 Y	发生炉无搅拌装置 Y<12mm;有搅拌装置 Y<16mm	GB 479
发热量 $Q_{ar,net}$	无烟煤: $Q_{ar,net}$ >23.0MJ/kg 烟煤: $Q_{ar,net}$ >21.0MJ/kg	GB213

表 1-15 合成氨用煤质要求

名 称	技 术 要 求	试 验 方 法
类别	无烟煤	GB 5751
品种	块煤	GB 189
粒度	大块 50~100mm;中块 25~50mm;小块 13~25mm; 洗混中块 13~70mm	GB 189
含矸率	<4%	MT 1
限下率	大块煤≤15%;中块煤≤18%; 小块煤≤21%;洗混中块≤12%	MT 1
水分 M_t	<6%	GB 211
挥发分 V_{daf}	≤10%	GB 212
灰分 A_d	一级<16%;二级 16%~20%;三级>20%~26%	GB 212
固定碳 FC_d	一级>75%;二级>70%~75%;三级 65%~70%;	GB 212
全硫 $S_{t,d}$	一级≤0.50%;二级 0.51%~1.00%;三级 1.01%~2.00%	GB 214
煤灰熔融性 ST	一级>1350℃;二级>1300~1350℃;三级 1250~1300℃	GB 219
热稳定性 ST ₊₆	≥70%	
抗碎强度(>25mm)	≥65%	GB 15473

表 1-16 高炉顶喷用无烟煤的煤质要求

项 目	技 术 要 求	测 定 方 法
粒度	<25mm	GB 189
灰分 A_d /%	特级≤8.00;一级>8~11;二级>11~14;三级>14~17	GB 212
全硫 $S_{t,d}$ /%	一级≤0.50;二级>0.50~1.10	GB 214
全水分 M_t /%	筛选煤≤7.0 水采煤≤10.0 洗选煤≤12.0	GB 211