

肖钢 马丽 编著

Coal

黑色的金子

——煤炭开发、利用与前景

煤炭是一种化石燃料。它是一种可燃沉积有机岩，蕴藏于地层之间，主要成分是碳、氢和氧。最初煤炭被误认为是一种“石头”，罗马人把这种“黑石头”用来制造珠宝首饰，因为它非常容易雕刻和打磨。随着人类生产实践和科学技术的不断进步，它的真实身份也逐渐被人类所认识。在高倍显微镜下，可以清楚地看到煤炭中保留的植物细胞结构、花粉、角质层等；另外，人们还在煤层的顶、底板岩层中发现了大量的树根、树叶、树干等植物化石。这些都充分证明了煤炭是由古代植物演变而来的“实情”。



化学工业出版社

中国地质出版社

Cool

黑色的金子

——煤炭开发、利用与前景

煤炭是我国的主要能源，也是我国的重要出口商品。随着国民经济的高速发展，煤炭的需求量将越来越大。本书系统地介绍了煤炭的地质、勘探、开采、洗选、运输、利用及环境保护等方面的知识，是从事煤炭行业工作的必备参考书，也是广大读者了解煤炭的入门读物。

① 地质出版社

肖钢 马丽 编著

Coal

黑色的金子

——煤炭开发、利用与前景



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书为一本科普读物,对煤炭的生成、开采、煤炭与人类生活的关系以及现代社会对煤炭的综合利用等方面作了较详细的介绍。在介绍煤炭基本知识的基础上,分析了煤炭作为当今世界的一种重要能源,在能源安全问题中的战略地位,即与未来能源的关系。最后综合了国际、国内煤炭发展的现状,认为煤炭在世界能源可持续发展的过程中,在经济、社会和环境三方面都将扮演重要角色。

本书通俗易懂,适合于一般读者阅读,可供关心能源和煤炭技术的科技人员、管理人员以及大专院校学生参考,也可以作为想进入这一专业领域的爱好者们的入门参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黑色的金子——煤炭开发、利用与前景/肖钢,马丽编著. —北京:化学工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-122-03906-4

I. 黑… II. ①肖…②马… III. ①煤炭资源-资源开发-研究
②煤炭资源-资源利用-研究 IV. F407.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 166382 号

责任编辑:王 丽
责任校对:吴 静

装帧设计:尹琳琳

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:化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张10 字数132千字 2009年1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:28.00 元

版权所有 违者必究

前言

PREFACE

近两百年来科学技术与社会文明的高速发展，得益于能源在人类衣、食、住、行等各方面发挥的积极作用。煤炭作为人类最早使用的化石能源，促进了第一次工业革命的发展，使人类社会步入了真正的文明时代。虽然在与石油和天然气的竞争中曾经一度被认为是“环境污染的罪魁祸首”而遭到冷落，但随着石油危机的出现，煤炭再次进入人们的视野，同时清洁、高效利用煤炭这一宝贵资源已得到世界各国的重视，成为现在炙手可热的能源话题。

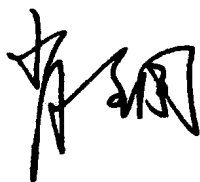
煤炭也是我国一次能源的主体。煤炭工业承载着经济发展、社会进步和民族振兴的历史重任。然而我们发现，很多人对煤炭的了解不够全面，甚至在某些方面存在误解。鉴于这种情况，作者萌发了编写一本介绍煤炭科普知识图书的想法。本书旨在以一种科普而又简洁的语言让人们了解煤炭，认识煤炭，从而更好地使用煤炭这一宝贵资源。

作者在这里要特别感谢 1994 年诺贝尔化学奖得主、《跨越油气时代：甲醇经济》一书的作者乔治 A. 奥拉 (George A. Olah) 教授 (该书的中译本已于 2007 年由化学工业出版社引进出版)，多年前他和比隆教授给予的指导为作者涉入化石能源高效转化领域奠定了基础。作者曾多年任教于丹麦技术大学，在化石能源的高效转化利用方面有一定建树，特别是在天然气 (非合成气法) 直接转化制甲醇及二甲醚、煤的转化利用等领域具有一定成果。作者作为主要参与者与丹麦哈尔杜·托普索公司 (Haldor Topsoe) 在化石能源催化转

化技术方面进行过长期合作并曾受聘于该公司。这些机会与经历都给作者很多启发与帮助，为本书的写作开阔了视野。目前作者已发表论文数十篇，作为主要发明人的国际及中国受理专利一百八十余项。

本书在撰写过程中得到许多专家同仁与朋友的帮助，感谢丹麦哈尔杜·托普索公司的 Per K. Bakkerud、美国英美煤炭公司 (Anglo Coal) 的 Vanessa Naicker、法国液化空气公司 (Air Liquide) 的 Robert Hennekes、德国巴斯夫公司 (BASF) 的 Heinrich-Josef Blankerts、南非沙索公司 (Sasol) 的陈黎明、好友侯晓峰等专家学者与作者所进行的有益的讨论。在此作者对这些朋友表示衷心的感谢！

本书作为一本科普读物，从煤炭的成因、性质、历史引出煤炭的开采、利用，直到对煤炭能源的发展展望，涉及地质、采矿、化工、能源、经济等多个学科领域，编著的过程也是作者学习提高的过程。如果读者能从本书中得到些许有用的知识，作者将感到不胜荣幸！书中的内容难免有不妥之处，敬请专家与广大读者批评指正。



2008. 8. 8



目 录

CONTENTS

第 1 章 什么是煤炭 /1

- 1.1 煤炭是如何形成的 /2
- 1.2 煤炭的历史与发展 /3
- 1.3 煤炭的品种与用途 /7

第 2 章 煤炭的开采 /11

- 2.1 矿井采煤 /12
- 2.2 露天开采 /14
- 2.3 瓦斯爆炸的原因与防范 /16
- 2.4 选煤与运输 /17
- 2.5 煤矸石及其利用 /19
- 2.6 采煤与当地社会 /21

第 3 章 煤炭的性质 /23

- 3.1 煤炭的宏观与微观特征 /24
- 3.2 煤炭的物理化学性质 /26
- 3.3 煤炭的工艺性质 /28

第 4 章 为什么用煤 /31

- 4.1 能源需求与供应 /32
- 4.2 煤炭——安全的能源供应 /35
- 4.3 现代人对煤炭的消费 /38

4.4 煤炭在人类生活中的利用方式 /40

4.5 煤炭利用存在的问题 /49

第5章 不断发展的煤炭综合利用 /53

5.1 煤炭的焦化 /55

5.2 煤炭的气化 /63

5.3 煤炭的液化 /80

5.4 煤炭制甲醇与二甲醚 /95

5.5 洁净煤发电技术 /105

第6章 煤炭与环境 /115

6.1 采煤与环境 /116

6.2 煤炭的使用与环境 /120

6.3 碳的封存与二氧化碳减排 /125

6.4 煤炭与可再生能源 /132

第7章 煤炭与未来能源 /137

7.1 煤炭在能源资源中的地位 /138

7.2 煤炭能源面临的机遇与挑战 /143

7.3 煤炭与能源未来 /148

参考文献 /151

第 1 章 什么是煤炭

2 黑色的金子 ——煤炭开发、利用与前景

煤炭是一种化石燃料。它是一种可燃沉积有机岩，蕴藏于地层之间，主要成分是碳、氢和氧。最初煤炭被误认为是一种“石头”，罗马人把这种“黑石头”用来制造珠宝首饰，因为它非常容易雕刻和打磨。随着人类生产实践和科学技术的不断进步，它的真实身份也逐渐被人类所认识。在高倍显微镜下，可以清楚地看到煤炭中保留的植物细胞结构、花粉、角质层等；另外，人们还在煤层的顶、底板岩层中发现了大量的树根、树叶、树干等植物化石。这些都充分证明了煤炭是由古代植物演变而来的“实情”。

1.1 煤炭是如何形成的

煤炭形成于 3.6 亿至 2.9 亿年前的石炭纪，它是远古时代植被的遗骸。这些植被最先在沼泽和泥炭沼泽中积累，加上淤泥和其他沉积物的堆积，地壳运动的作用将这些沼泽和泥炭沼泽埋入很深的地层中。被掩埋的植物由于受到高温、高压的作用，历经一系列物理化学变化，转变为泥炭，最后形成煤炭。这些植物最终能够成为煤炭，是因为在它们死后没有以通常在氧气作用下生成二氧化碳和水的方式分解。每个煤矿床的质量取决于煤炭形成过程的温度、压力和时间，这被称为煤炭的“有机成熟”。

归纳起来，煤炭的形成可以分为下面三个阶段。

(1) 菌解阶段（即泥炭化阶段） 当植物堆积在水下被泥砂覆盖起来的时候，便逐渐与氧气隔绝，由厌氧细菌参与作用，促使有机质分解而生成泥炭。通过这种作用，植物遗体中氢、氧成分逐渐减少，而碳的成分逐渐增加。泥炭质地疏松、褐色、无光泽、相对密度小，可看出有机质的残体，用火柴烧可以引燃，烟浓灰多。

(2) 煤化作用阶段（即褐煤阶段） 当泥炭被沉积物覆盖形成顶板后，便成了完全封闭的环境，细菌作用逐渐停止，泥炭开始压缩、脱水而胶结，碳的含量进一步增加，泥炭变为褐煤，这称为煤化作用。褐煤是低有机成熟度的煤炭品种，颜色从深黑色到各种色调的褐色都有，光泽暗淡，基本上不见有机物残体，质地较泥炭致密，用火柴可以引燃，有烟。

(3) 变质阶段(即烟煤及无烟煤阶段) 在褐煤形成后的许多个百万年期间, 温度和压力的持续作用使褐煤发生进一步变化, 使其有机成熟度逐渐提高, 形成次烟煤。经过更多的化学物理变化后, 这些煤炭变得更黑、更硬, 形成烟煤或硬煤。而且在合适的条件下, 有机成熟度的逐步提高过程还可继续, 最终形成无烟煤。这种作用是煤的变质作用。烟煤颜色为黑色, 有光泽, 致密状, 用蜡烛可以引燃, 火焰明亮, 有烟。无烟煤颜色为黑色, 质地坚硬, 有光泽, 用蜡烛不能引燃, 燃烧无烟。几种煤炭的外观如图 1.1 所示。

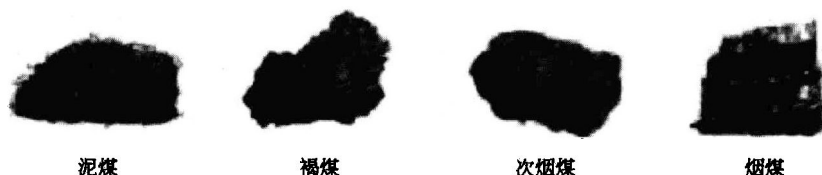


图 1.1 几种煤炭的外观

1.2 煤炭的历史与发展

在煤炭形成的过程中, 植物中的碳成分和几百万年来它们通过光合作用所获得的太阳能都最终汇集于煤炭中, 从而聚集了大量能量并深埋于地下, 直到被人类发现并利用。在漫长的地球历史年表中, 人类对煤炭资源的利用应该算才刚刚开始。

中国是世界上最早认识、开采和利用煤炭的国家。早在 2000 多年前的战国时期, 我国就有文字记载煤炭开采、利用的历史, 在《山海经》中煤炭被称为“石涅”, 产地主要在现在的山西、陕西和四川一带。例如书中所指的“女床之山”, 在华阴西六百里, 也就是现今的渭北煤田麟游、永寿一代; “女儿之山”, 在今四川双流和什邡煤田分布区域内。在汉代的一些史料中有河南六河沟、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。考古发现河南巩县还能见到当时用煤饼炼铁的遗迹。汉朝以后, 煤被称为“石墨”或“石炭”。可见中国劳动

4 黑色的金子 ——煤炭开发、利用与前景

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。

西方人则是在晚于中国几百年的公元 315 年才有了煤炭的文字记载。马可·波罗曾经这样描述他在中国见到的煤炭：中国有一种黑石头，像木材一样能够燃烧，火力比木材强，从晚上烧到第二天早上还不熄灭，价钱比木材便宜。这样的描述让欧洲人把它当作奇文来传颂。西方国家对煤炭的使用开始于罗马人入侵英国时期，而且仅仅少量用于燃烧取热，主要作为装饰品使用。直到 12 世纪晚期，煤炭作为燃料重新出现在英国的泰恩河岸，尤其是富含煤炭的纽卡斯尔地区，但仍然没有广泛使用。直到 16 世纪，随着英国人口特别是伦敦人口的急剧增加，城市不断扩大，城市附近的树林被砍伐用以增加城市土地面积，因此人们只能从别处运来木材使用，而且越来越远。这些木材不仅可以用来取暖、烹饪，在大多数的工业（炼铁、造船、酿酒等）中都是重要的能源与材料。随着当时木材短缺问题的日益凸显，木材价格不断上涨，使得穷人逐渐买不起木材。这个时期属于特别困难时期，因为当时刚进入“小冰期”（这个时期一直持续到 18 世纪）。然而当时严重的能源危机并没有真正出现，这要归功于煤炭的出现。17 世纪初期，煤炭已经逐渐成为了英国的主要燃料资源。不过问题随之而来：燃烧煤炭所造成的浓烟使伦敦成为全欧洲空气质量最差的城市。在一年中的某些日子里，太阳光几乎不能穿透伦敦城市的煤烟；而旅游者在离伦敦几英里远的地方，未见其面便能闻其味了。

煤炭成为真正的重要能源起因于 18 世纪前期蒸汽机的发明。蒸汽机是随之而来的工业革命的心脏，就是以煤炭作为燃料的。在那个年代，煤矿业所面对的主要难题是渗水以及各种形式的水淹。雨水从地面渗入然后积聚在矿道里，一旦矿井在地下水位以下，周围的地下水也会使问题进一步加重。很多煤矿会因此慢慢地湮没于水下。如果煤矿是在山上，可以用简单的排水管道解决问题；但是随着采矿不断深入地下，就需要另想他法。最初的原始办法是依靠矿工们将水装在他们背上的矿桶里运出矿井，但是这样做很不方便，因此又出现了很多提高人力资源利用率的办法。例如，将一连串水桶或者原始水泵通过人力、风车、水车、马力等来操纵运水（如图 1.2 所示），然而没有一种方法是非常经济有效的。

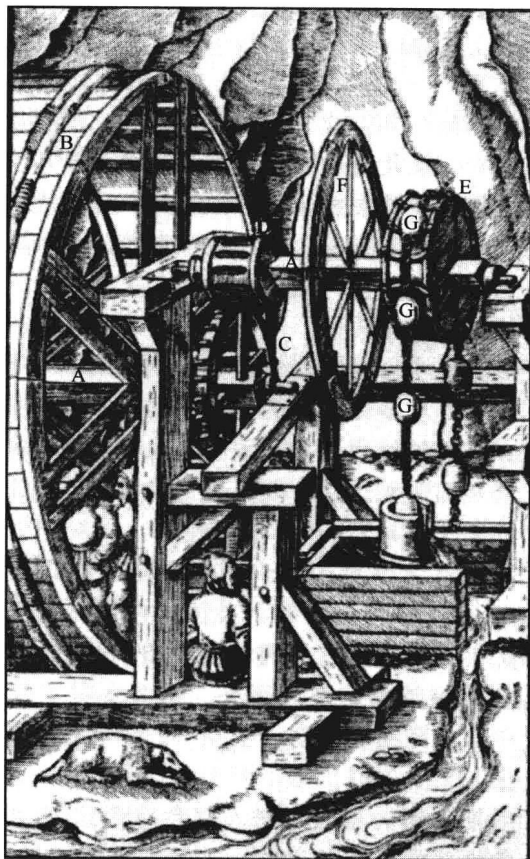


图 1.2 中世纪煤矿排水图

(来源于 Georgius Agricola 的版画——De Re Metallica)

A—轮轴；B—靠脚踩驱动的轮子；C—齿轮；D—由圆型梯级构成的鼓状体；

E—由铁夹子固定住的鼓状体；F—二级轮；G—球状物

在人们不断的努力与革新中，由托马斯·纽库曼 (Thomas Newcomen) 发明的蒸汽机解决了矿井干燥的问题，詹姆士·瓦特 (James Watt) 对这种蒸汽机的改进大大提高了蒸汽机的效率，使得蒸汽机可以在远离煤矿的工厂使用。这也促使煤炭在人类生活中逐渐发挥更大的作用。

同时另外一项技术革新，即利用基于煤炭加工得到的焦炭所进行的炼铁生产技术，是煤炭促进工业革命的又一重要事件。在煤炭广泛应用之前，制造发动机及建造工厂所需的钢铁主要依赖于木炭炼铁技术。木

6 黑色的金子

——煤炭开发、利用与前景

炭需要燃烧大量的木材烤制获得，而当时木材在英国越来越稀少。木炭同时可以提供热量和还原铁矿石所需的单质碳，而煤由于其中含有其他杂质而不适合用来直接炼铁。经过一个多世纪的实验以后，人们终于找到了用煤炼铁的关键。以用木材转化为木炭的同样方式，煤炭首先通过烘烤去除挥发物，从而得到焦炭。到 18 世纪 70 年代为止，技术已发展到了能在炼钢所有步骤中使用焦炭的水平。凭借这个技术突破，英国这个原先依赖于钢铁进口的国家在短短几年之内变成了世界上最高效的钢铁生产国，使得英国能在本土和海外广阔的殖民王国里建造很多大型的工厂。

“煤炭经济”导致了规模日益扩大的机械化工厂及其劳动力在城市里的集中以提高效率。工业革命的中心是曼彻斯特，它是英国最主要的生产中心。这座城市也是第一条蒸汽机车公共铁路的发源地。这条“曼彻斯特和利物浦铁路”在 1830 年开通（图 1.3）。“铁路之父”是乔治·史蒂芬森（George Stephenson），他是第一个设想在陆地上大量运输煤炭的人。通过蒸汽机车，他的梦想变成了现实。然而这个发明（蒸汽机车）迅速给社会带来的革命性作用远远超越了煤炭工业领域。

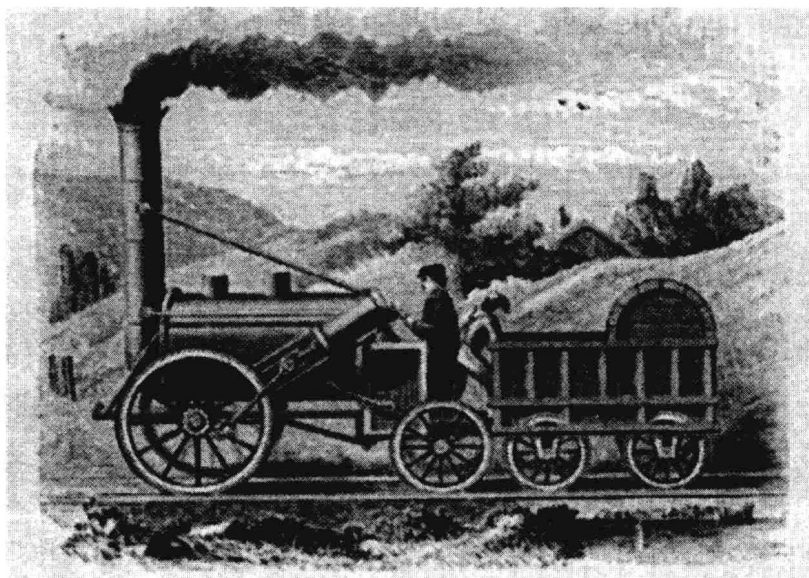


图 1.3 史蒂芬森的“火箭号”机车（1829 年）

回顾上面的历史不难看出，煤炭可能是最重要的矿物燃料。这是因为煤炭曾激发了工业革命，而正是由于工业革命的出现才造就了现代工业社会。到了 20 世纪，在发电领域中煤炭作为燃料逐渐被石油、天然气、核能补充和替代。煤炭曾一度被认为是一种过时的“肮脏燃料”，其发展前景被预言注定非常有限。只是在 20 世纪 70 年代能源危机和对核能安全性日益关注的情况下，煤炭再一次成为具有吸引力的发电燃料。由于煤炭资源地质分布分散，再加上煤炭是质量重、体积大的固体，在运输上花费颇巨，所以一般只在矿源周围加以利用。具有经济价值的可开采煤矿资源已被证实是巨大的，接近 10000 亿吨。以现在的消耗速度，可以足够维持 170 年以上。煤矿的储藏量/开采量比值（或称储/采比， R/P ）约是天然气的 3 倍，是石油的 4 倍多。不像石油和天然气，煤炭的资源储量应当还可以维持下两个世纪。目前世界煤炭储藏总量估计超过 62000 亿吨。煤炭资源的 R/P 比值没有继续增大的主要原因是缺乏对新的可开采煤炭资源的勘探动力，因为目前已知的煤炭资源储量已经足够庞大了。在过去的 100 年里，煤炭的产量上升了 10 倍，但是煤炭价格却没有明显上涨。相反，采矿技术的不断改进和提高将会继续增加煤矿的产量并稳定维持较低的采煤及后处理费用。

1.3 煤炭的品种与用途

按照成因分类，煤炭主要分为由高等植物生成的腐殖煤和由低等植物生成的腐泥类，以及由上述两类混合形成的腐殖腐泥煤三大类。其中以腐殖煤在地球上的比例最多。各类煤的基本特性与用途如下。

1.3.1 腐殖煤

古代高等植物死亡后，其残骸堆积在空气不太充足的低地沼泽中，产生不完全的氧化分解作用（称为半败作用），随后，由于死亡植物残骸的不断堆积，它们完全与空气隔绝，这时植物残骸依靠本身含有的氧而发生厌氧细菌的分解作用，从而开始脱水、去羧基（ $-COOH$ ），放出二氧化

8 黑色金子 ——煤炭开发、利用与前景

碳、水及甲烷等气体，形成了凝胶状的泥炭。随着地壳的下沉，堆积在沼泽中的泥炭就逐渐被黏土、砂石等物质堆积而形成了岩层。泥炭在上覆岩层的压力作用下又发生了压紧、失水、胶体老化、硬结等物理和物理化学作用，使覆盖泥炭的化学组成也发生了不断的变化，最后变成了碳含量更高、氧和氢含量更低而致密度更高的褐煤。褐煤在岩层压实下又经过高温（200℃左右）、高压（几千至几万大气压）作用下而逐渐演变成烟煤和无烟煤。

地球上真正由高等植物形成的腐殖煤由泥盆纪开始。世界的煤炭资源中有 95% 以上为腐殖煤。腐殖煤的原始成煤物质为高等植物中的纤维素、半纤维素和木质素等主要成分，它们是在植物死亡后逐渐形成的。

腐殖煤具有油质光泽、韧性较大、氢含量高、挥发分高、焦油产率高等特点，适合于作低温干馏和加氢液化的原料。

1.3.2 腐泥煤

细胞中含有大量原生质的古代菌藻类低等植物和浮游生物死亡后，堆积在湖沼、海湾等水体底部的缺氧环境中，经过腐败作用、物理作用及物理化学作用（即煤化作用）后转变成腐泥煤。腐泥煤在自然界很少，它常以薄层状或透镜状夹于腐殖煤中。腐泥煤的挥发分高，如相当于褐煤阶段的腐泥煤的挥发分常高达 80%~95% 左右，而由腐殖煤形成的褐煤的挥发分一般只有 40%~65% 左右。

腐泥煤的主要特点是呈灰黑色，结构较均一，致密块状，硬度和韧性都较大，同时光泽暗淡，具贝壳状断口，且氢含量高，焦油产率也高，适宜作低温干馏的原料，制取有机化工原料和人造液体燃料。

1.3.3 腐殖腐泥煤

腐殖腐泥煤是以古代低等植物和高等植物一起作为原始成煤物质而形成的煤。它是一种介于腐泥煤与腐殖煤之间的过渡型煤，主要有烛煤和煤精。其外观多呈灰黑色或灰色，致密而坚硬，其中烛煤的韧性较大，贝壳状断口，块状结构，其氢含量、焦油率和挥发分低于腐泥煤但高于腐殖煤。

根据煤炭的有机成熟度，煤炭又分为褐煤、烟煤、无烟煤三大类，事实上工业上炼焦用煤也主要分为以上三类。从泥炭到无烟煤的成熟过程（即煤化）中，煤炭经历的变化程度对其物理化学特性具有重要影响，称为煤炭的“煤阶”。

褐煤和次烟煤都属于低煤阶煤，一般比较柔软、易碎，光泽暗淡、粗糙，特点是水分含量高、含碳量低，因此能量含量较低。褐煤也称柴煤，在一些年轻的褐煤中还可以看到树木的结构。褐煤化学反应性强、热稳定性差，因其具有开采和运输成本低、经济效益高的特点，目前主要用途是作为发电燃料使用。对于氢碳比大、热值高的褐煤则可以直接液化生产人造石油和化学产品的原料。另外褐煤还可以通过气化作为合成氨的原料，同时这种气化产物也可以作为制造合成甲醇和二甲醚的原料气。次烟煤一般在国外的相关分类中出现，它实际是一种煤化程度高于褐煤又低于烟煤的过渡态煤，性能与用途都与褐煤接近。

烟煤和无烟煤属于高煤阶煤，比较坚硬和结实，往往有黑色、玻璃质的光泽。这些煤炭的含煤量较高，水分较低，因而可产生更多能量。无烟煤位于煤阶尺度的最高端，这意味着它具有相应的高含碳量和高能量，以及较低的水分。

烟煤是世界上资源和产量都最大的一种煤炭，通常分为两大部分：一部分是具有较强粘结性或结焦性的炼焦用煤；另一部分是没有粘结性或粘结性很弱，一般作为动力用的动力煤。动力煤大部分作为发电用煤，也有部分作为工业锅炉和窑炉的燃料以及气化用煤。

无烟煤是煤化程度最高的一种煤，外观多呈金属光泽。这种煤无粘结性，着火点高，一般达 $360\sim 420^{\circ}\text{C}$ ，空气中不易风化和自燃，且燃烧时不冒烟。中国的无烟煤资源和生产量都居世界之首。无烟煤用途十分广泛，它的最大用户是民用蜂窝煤和煤球，其次是作为电厂单独发电或与烟煤掺烧后发电（见图 1.4 煤的品种与用途）。