

尚建选 马宝岐 张秋民 沈和平 编著

低阶煤分质转化 ◀◀◀ ▶▶▶ 多联产技术

DIJIE MEI FENZHI ZHUANHUA
DUOLIANCHAN JISHU



煤炭工业出版社

低阶煤分质转化多联产技术

尚建选 马宝岐 张秋民 沈和平 编著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

低阶煤分质转化多联产技术 / 尚建选等编著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978-7-5020-4181-6

I. ①低… II. ①尚… III. ①煤炭工业—无污染技术
IV. ①X784

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 022609 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 889mm × 1194mm¹/₁₆ 印张 21¹/₂
字数 619 千字 印数 1—700
2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷
社内编号 7004 定价 120.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 简 介

全书共分5章,介绍了低阶煤的资源及主要特性、干燥方法、热解原理及技术;对低阶煤分质转化多联产路线、集成优化方法、国内外的工艺及特点作了论述,并对低阶煤多联产的模式和方案作了探讨。

本书可供从事煤炭能源开发转化,特别是煤化工领域的科研和工程技术人员使用,也可供大学相关专业师生参考。

前 言

从我国“缺油、少气、煤炭资源相对丰富”的资源禀赋条件和现有的技术发展分析,能源自给率的保障只能来自于煤炭资源的大规模使用,以煤为主的能源战略是必然的选择。

虽然我国煤炭资源相对丰富,但随着我国经济的迅速发展,其生产量和消费量已均为世界第一位,并从2009年开始成为煤炭净进口国。而我国人均煤炭探明资源占有量仅为234.4 t,低于世界人均占有量(312.7 t)。因此,在发展煤化工产业过程中,一定要坚持最大限度地利用煤炭资源,走高效率、低排放、清洁加工转化利用的发展之路。

对于占我国煤炭总量、探明保有储量以及目前煤炭产量均在55%以上的低阶煤(褐煤、长焰煤、不黏煤、弱黏煤),其煤岩组分中凝胶化组分相对较高,工业分析组成中挥发分较高,其有机质化学结构中侧链较多,有机质元素组成中氢氧含量较高。低阶煤的化学结构特点决定了可以最小的能耗和物耗,通过科学的煤炭转化方式,同步获取所需的化学品和清洁能源,实现煤炭资源的高效转化及多联产利用。

陕北地区煤炭资源丰富,煤炭总分布面积约27140 km²,探明煤炭资源储量为1460 × 10⁸ t,占陕西省的86.4%,占全国的14%,是世界八大煤田之一。陕北煤属低灰、低硫、高热量的长焰煤,其含油率高达10%~12%,是优质的热解原料煤和化工用煤。从陕北煤质特点出发,采用热解(干馏)加工技术,对煤中不同成分进行分质综合利用,可以做到物尽其用,提高能源利用效率,发展低碳经济,对推动节能减排改变经济发展方式具有重要意义。

陕西煤业化工集团通过多年的研究总结和实践,根据陕北长焰煤各组分的特点,探索出一条以低阶煤热解为核心的分质转化多联产路线。为了总结在低阶煤分质转化多联产技术研究、设计和生产实践过程中的体会,我们编写了本书,以期能对推动我国煤热解产业的发展尽一点力。

全书共分5章,第1章概述:介绍了我国低阶煤的资源、主要特性、干燥方法、热解原理和技术、多联产的技术。第2章低阶煤分质转化多联产系统:对多联产的路线、核心技术的特点,集成优化的方法作了论述。第3章国外低阶煤分质转化多联产技术:主要是对其工艺过程和特点作了讨论。第4章国内低阶煤分质转化多联产技术:对其工业化示范和研究现状作了讨论。第5章低阶煤分质转化多联产的探讨:讨论了多联产的模式和方案,对发展我国低阶煤多联产提出了建议。最后对我国低阶煤多联产的发展进行了展望。

本书由尚建选、马宝岐、张秋民、沈和平编写。全书由尚建选、马宝岐负责制定编写提纲、统稿、修改和定稿。

在本书中引用了国内外许多学者的相关研究成果或者观点，在此深表感谢！

大连理工大学赵树昌教授对本书的初稿进行了审阅和修改，使我们受益匪浅，特此致以谢意！

本书在编写过程中得到张相平、杨占彪、甘建平、郑化安、卢强等的支持和帮助。何德民对本书的图、表进行了核对，并提供了相关文献；逯俊庆、董芳儒、刘娜、袁辉峰等为本书的制图、制表付出了辛勤劳动。在此，向上述同志致以衷心的感谢！

由于本书内容涉及面较宽，编者经验不足、水平有限，加之时间紧促，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者给予批评指正。

编 者

2012 年 12 月

目次

1 概述	1
1.1 我国低阶煤的资源	1
1.2 低阶煤的主要特性	6
1.3 低阶煤的干燥方法	10
1.4 低阶煤的热解原理	24
1.5 低阶煤的热解技术	50
1.6 煤基多联产的技术	67
参考文献	73
2 低阶煤分质转化多联产系统	79
2.1 低阶煤热解产物的组成及特性	79
2.2 低阶煤分质转化多联产的路线	97
2.3 多联产系统中核心技术的特点	140
2.4 低阶煤分质转化多联产的集成	145
2.5 低阶煤分质转化多联产的优化	164
参考文献	169
3 国外低阶煤分质转化多联产技术	180
3.1 美国 COED 法煤低温热解—燃料油多联产技术	180
3.2 Toscoal 法煤低温热解—合成油—电力多联产技术	188
3.3 德国 Lurgi—Ruhrgas 法煤热解多联产工艺	199
3.4 苏联 3TX—175 (ETCH—175) 煤热解多联产工艺	205
3.5 澳大利亚煤热解多联产工艺 (CSIRO 工艺)	208
3.6 波兰煤热解多联产工艺	215
3.7 日本煤快速热解多联产技术	219
3.8 煤加氢热解多联产技术	222
参考文献	230
4 国内低阶煤分质转化多联产技术	233
4.1 陕西冶金研究设计院内热式直立炉热解多联产技术	233
4.2 浙江大学的热电气多联产工艺	237
4.3 北京动力经济研究所的热电气多联产工艺	245
4.4 清华大学的热电气多联产工艺	251
4.5 北京蓝天新源科技有限公司的多联产工艺	256
4.6 陕煤化神木富油公司煤热解—燃料油多联产技术	259

4.7 煤热解—气化—燃烧多联产技术	269
4.8 煤拔头四联产技术	272
4.9 煤低温热解多联产技术研究	276
参考文献	290
5 低阶煤分质转化多联产的探讨	294
5.1 低阶煤分质转化多联产模式	294
5.2 低阶煤分质转化多联产方案	302
5.3 建设煤化工循环经济多联产园区	312
5.4 科学有序稳步发展低阶煤多联产	327
参考文献	330
后记	333

1 概 述

1.1 我国低阶煤的资源

煤的分类标准很多,各个国家都制定了不同的分类标准。常用的分类方法有两种,一种是按成煤原始物质不同,可分为腐泥煤、腐植腐泥煤、残植煤和腐植煤;另一种是按照煤化作用的深浅程度(煤阶)分类,可分成低阶煤、中阶煤和高阶煤。在联合国欧洲经济委员会颁布的《煤层煤分类》(1995)方案中,规定 $R_{\text{ran}} \geq 0.6\%$ 的煤为中阶煤或高阶煤; $R_{\text{ran}} \leq 0.6\%$ 的煤必须当恒湿无灰基高位发热量 $Q_{\text{gr,maf}} \geq 24 \text{ MJ/kg}$ 才划归为中阶煤;其余为低阶煤。中国低阶煤的分类顺序是先按低阶煤透光率 P_{M} 来区分烟煤或褐煤。当 $V_{\text{daf}} > 37.0\%$,同时 $P_{\text{M}} > 50\%$ 者,归属烟煤;当 $V_{\text{daf}} > 37.0\%$,同时 $P_{\text{M}} > 30\% \sim 50\%$ 的煤,则用恒湿无灰基高位发热量 $Q_{\text{gr,maf}} = 24 \text{ MJ/kg}$ 作为划分界限,即大于 24 MJ/kg 的煤,划归为烟煤(长焰煤);只有当 $V_{\text{daf}} > 37.0\%$, $P_{\text{M}} > 30\% \sim 50\%$,同时其 $Q_{\text{gr,maf}} \leq 24 \text{ MJ/kg}$ 时,才划归为褐煤。低阶煤主要包含褐煤和低变质烟煤(长焰煤、不黏煤、弱黏煤),在国外一般将低变质烟煤称为次烟煤^[1]。

1.1.1 低阶煤的储量

据《BP 世界能源统计年鉴 2012》^[2],2011 年年底探明的煤炭可开采储量全球总计 $860938 \times 10^6 \text{ t}$,可供开采 112 年。在煤炭可开采储量中,次烟煤与褐煤储量为 $456176 \times 10^6 \text{ t}$,占全球总量的 52.99%。但是,次烟煤与褐煤可采储量的 80.88% 集中在美国(28.23%)、俄罗斯(23.66%)、中国(11.47%)、德国(8.9%)和澳大利亚(8.62%)5 国。

2011 年世界煤炭探明可采储量及储采比见表 1-1。

表 1-1 2011 年世界煤炭探明可采储量及储采比

国家/地区	无烟煤 + 烟煤/ 10^6 t	次烟煤 + 褐煤/ 10^6 t	合计/ 10^6 t	百分比/%	储采比
美国	108501	128794	237295	27.6	239
加拿大	3474	3108	6582	0.8	97
墨西哥	860	351	1211	0.1	77
北美合计	112835	132253	245088	28.5	228
巴西	—	4559	4559	0.5	①
哥伦比亚	6366	380	6746	0.8	79
委内瑞拉	479	—	479	0.1	55
其他南美国家	45	679	724	0.1	①
中南美合计	6890	5618	12508	1.5	124
保加利亚	2	2364	2366	0.3	64
捷克共和国	192	908	1100	0.1	19
德国	99	40600	40699	4.7	216
希腊	—	3020	3020	0.4	53
匈牙利	13	1647	1660	0.2	174

表 1-1 (续)

国家/地区	无烟煤 + 烟煤/ 10^6 t	次烟煤 + 褐煤/ 10^6 t	合计/ 10^6 t	百分比/%	储采比
哈萨克斯坦	21500	12100	33600	3.9	290
波兰	4338	1371	5709	0.7	41
罗马尼亚	10	281	291	②	8
俄罗斯联邦	49088	107922	157010	18.2	471
西班牙	200	330	530	0.1	81
土耳其	529	1814	2343	0.3	30
乌克兰	15351	18522	33873	3.9	390
英国	228	—	228	②	12
其他欧洲及欧亚大陆	1440	20735	22175	2.6	238
欧洲 + 欧亚大陆合计	92990	211614	304604	35.4	242
南非	30156	—	30156	3.5	118
津巴布韦	502	—	502	0.1	202
非洲其他国家	860	174	1034	0.1	①
中东	1203	—	1203	0.1	①
中东 + 非洲合计	32721	174	32895	3.8	126
澳大利亚	37100	39300	76400	8.9	184
中国	62200	52300	114500	13.3	33
印度	56100	4500	60600	7.0	103
印尼	1520	4009	5529	0.6	17
日本	340	10	350	②	275
新西兰	33	538	571	0.1	115
朝鲜	300	300	600	0.1	19
巴基斯坦	—	2070	2070	0.2	①
韩国	—	126	126	②	60
泰国	—	1239	1239	0.1	58
越南	150	—	150	②	3
其他亚太地区	1582	2125	3707	0.43	88
亚太地区合计	159326	106517	265843	30.9	53
全球总计	404762	456176	860938	100.0	112

注：① 超过 500 年。

② 少于 0.05%。

我国低变质烟煤主要包括长焰煤、不黏煤、弱黏煤，已查明资源储量为 3330.09×10^8 t，占全国煤炭资源总量的 32.61%，占非炼焦煤的 45.01%。

据全国第三次煤炭资源预测结果表明，垂深 2000 m 以浅的低变质烟煤预测资源量为 24215.10×10^8 t，占全国煤炭预测资源量的 53.2%。

褐煤查明资源储量 1334.69×10^8 t，占我国煤炭资源总量的 13.07%，占非炼焦煤的 18.05%。

据全国第三次煤炭资源预测结果表明，垂深 2000 m 以浅的褐煤预测资源量为 1903.06×10^8 t，占全国煤炭资源预测资源量的 4.18%（表 1-2）。

表1-2 我国煤炭预测资源量^[3]10⁸ t

省(市、区)	预测资源量	褐 煤	低变质烟煤	气 煤	肥 煤	集 煤	瘦 煤	贫 煤	无烟煤
北京	86.72	—	—	—	—	—	—	—	86.72
天津	44.52	—	—	44.52	—	—	—	—	—
河北	601.39	9.98	7.24	508.44	30.19	—	—	—	45.54
山西	3899.18	12.68	53.85	70.42	343.90	508.02	301.89	589.79	2018.63
内蒙古	12250.40	1753.40	9004.00	1079.45	11.02	364.18	0.23	23.96	8.15
辽宁	59.27	6.04	25.35	7.52	1.05	1.63	—	2.15	15.53
吉林	30.03	7.46	11.06	3.68	0.48	0.71	1.88	1.96	2.80
黑龙江	176.13	44.49	8.53	83.33	—	37.65	0.55	1.58	—
上海	—	—	—	—	—	—	—	—	—
江苏	50.49	—	—	34.71	1.57	6.90	2.022	3.45	1.84
浙江	0.44	—	—	—	0.44	—	—	—	—
安徽	611.59	—	0.66	370.42	35.00	154.37	33.69	3.56	13.89
福建	25.57	—	—	—	—	—	0.09	—	25.48
江西	40.84	—	0.38	1.60	0.83	6.09	2.35	5.52	24.07
山东	405.13	24.67	3.23	220.68	76.50	5.64	—	27.66	46.75
台湾	—	—	—	—	—	—	—	—	—
河南	919.71	8.82	3.75	86.11	19.20	163.77	87.94	109.29	440.83
湖北	2.04	—	—	—	—	—	—	0.49	1.55
湖南	45.35	—	0.15	1.27	2.28	2.06	1.31	1.65	36.63
广东	9.11	0.41	—	—	0.06	0.07	—	0.74	7.83
广西	17.64	1.69	1.44	—	—	—	0.44	5.46	8.61
海南	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—	—
四川	303.79	14.30	—	4.90	5.17	5.71	55.38	14.78	133.26
贵州	1896.90	—	—	5.22	41.40	319.57	133.97	247.27	1149.47
云南	437.87	19.11	0.67	6.22	3.50	124.00	31.17	125.48	127.64
西藏	8.09	—	0.08	0.08	0.20	0.13	0.14	0.03	7.43
陕西	2031.10	—	523.79	800.15	115.89	111.49	64.45	94.53	320.80
甘肃	1428.87	—	242.49	1172.99	1.63	—	5.72	4.83	1.21
宁夏	1721.11	—	1264.83	84.31	20.73	17.75	24.79	123.52	185.18
青海	380.42	—	143.60	51.86	7.85	33.00	30.34	81.18	32.59
新疆	18037.30	—	12920.00	4754.50	312.60	24.80	25.40	—	—
全国	45521.04	1903.06	24215.10	9392.38	1032.11	1957.29	803.75	1468.88	4742.43

全国不同深度预测煤炭资源的煤类比例见表1-3。从表1-3可以看出,褐煤主要赋存在浅部;垂深1000 m以浅的预测资源以低变质烟煤为最多,中变质烟煤的2/3在垂深1000 m以下,贫煤、无

烟煤则以垂深 1000 m 以下为主^[4]。

表 1-3 全国不同深度预测煤炭资源的煤类比例

%

预测垂深	褐 煤	低变质烟煤	中变质烟煤	贫煤、无烟煤
600 m 以浅	12.5	55.2	23.3	9.0
1000 m 以浅	8.4	55.2	23.7	12.6
2000 m 以浅	4.2	53.2	29.0	13.6

1.1.2 低阶煤的分布

1.1.2.1 褐煤资源的分布

从中国褐煤的形成时代看,以中生代侏罗纪褐煤储量的比例最多,约占全国褐煤储量的 4/5,主要分布在内蒙古东部与东北三省紧密相连的东三盟地区。我国的侏罗纪褐煤中极少有早中侏罗纪褐煤,一般均属晚侏罗纪褐煤,其特点是含煤面积大,煤层厚,如内蒙古东部的胜利煤田,其煤层总厚度达 20~100 m 以上,最厚处可达 237 m^[5]。

新生代第三纪褐煤资源约占全国褐煤储量的 1/5,其赋存主要在云南省境内。四川、广东、广西、海南、山东和东北三省等省也有少量第三纪褐煤。其中,晚第三纪褐煤资源的特点是除云南境内的昭通煤田和小龙潭煤田等煤层厚度大,其可采总厚度可达 50 m 以上外,其余绝大多数煤田的煤层厚度不超过 10 m,且矿点多分散、煤层埋藏浅,适合于小型露天开采。早第三纪褐煤资源主要分布在东北三省和山东省境内,分布面积少,多为中小型煤田,煤层埋藏相对较深,适于井工开采^[6]。

由煤田地质勘探资料表明,中国的褐煤资源主要分布在华北地区,约占全国褐煤地质储层的 3/4 以上(表 1-4),其中又以内蒙古东部地区赋存最多。西南区是我国仅次于华北区的第二大褐煤基地,其储量约占全国褐煤的 1/8,其中大部分又分布在云南省境内。但西南区的褐煤几乎全部是第三纪较年轻褐煤,而华北区的褐煤则绝大多数为侏罗纪的年老褐煤。东北、中南、西北和华东四大区褐煤资源的数量均较少^[7]。

表 1-4 中国各大区褐煤储量分布

%

大区名称	华北	东北	华东	中南	西南	西北
占全国褐煤储量	77.8	4.7	1.3	2.0	12.5	1.7
占本区煤炭总储量	16.2	19.5	2.6	7.6	15.8	2.9

由表 1-5 可知,内蒙古自治区是我国褐煤储量占绝对多数的省(区),占全国褐煤资源的 3/4 以上。褐煤储量占全国第二位的云南省,其褐煤资源也只占全国的 1/8 左右。其他各省(区)的褐煤储量均不到全国的 3%。

表 1-5 中国各省(区)褐煤储量分布^[7]

省(区)	占全国褐煤储量/%	主要成煤时代	占本省煤炭储量/%
内蒙古	77.1	晚侏罗纪	47.4
云南	12.6	晚第三纪	65.7
黑龙江	2.6	早第三纪	8.5
辽宁	1.5	早第三纪	16.5

表 1-5 (续)

省 (区)	占全国褐煤储量/%	主要成煤时代	占本省煤炭储量/%
山东	1.3	早第三纪	4.3
吉林	0.9	早第三纪	8.0
广西	0.8	第三纪	35.8
其他各省	2.7	第三纪	—

1.1.2.2 低变质烟煤资源的分布

我国低变质烟煤主要赋存在中生代的侏罗纪地层内。其中,尤以西部地区的早、中侏罗世时期形成的不黏煤和长焰煤比例最大,如陕西和内蒙古交界的神(府)东(胜)煤田的不黏煤和长焰煤的探明储量高达 2236×10^8 t;以弱黏煤为主的陕西黄(陵)陇(县)煤田的探明储量达 131×10^8 t;彬长煤田(不黏煤和弱黏煤)的探明储量为 91×10^8 t;宁夏的灵武煤田以产不黏煤为主,其探明储量为 41×10^8 t;甘肃华亭和安口煤田的不黏煤探明储量为 32×10^8 t。在新疆已探明的近 977×10^8 t 的煤炭资源中,大部分也为不黏煤、弱黏煤和长焰煤等烟煤。可见,我国西部地区的低变质烟煤占全国的绝大部分。

在低变质烟煤的矿井可采储量中,神东矿区为最多,达 35.91×10^8 t (表 1-6),其次为大同矿区,超过 17×10^8 t;可采储量超过 10×10^8 t 的还有准格尔黑岱沟露天矿。其他各生产矿区的可采储量,一般不超过 4×10^8 t。

低变质烟煤中不同成煤时代、不同煤种和不同可采储量的分布详见表 1-6。

表 1-6 我国主要低变质烟煤的资源^[8]

局、矿名称	可采储量/ 10^8 t	煤 类	成煤时代
神东	35.91	不黏、长焰煤	早、中侏罗世
大同	17.67	弱黏煤	早、中侏罗世
抚顺西露天	0.12	长焰煤	早第三纪
阜新	2.71	长焰煤	晚侏罗世
铁法	4.50	长焰煤	晚侏罗世
准格尔	13.57	长焰煤	石炭、二叠纪
依兰	0.79	长焰煤	早第三纪
窑街	1.11	长焰煤	早、中侏罗世
靖远	3.84	不黏煤	早、中侏罗世
哈密	1.43	不黏煤	早、中侏罗世
义马	3.35	长焰煤	早、中侏罗世
灵武	3.34	不黏煤	早、中侏罗世
大同市矿	2.41	弱黏煤	早、中侏罗世

低变质烟煤主要分布在我国西北(赋存储量 13128.71×10^8 t,占全国低变质烟煤预测资源量的 54.2%)和华北(赋存储量 10427.66×10^8 t,占全国低变质烟煤预测资源量的 43.0%),这两地区低变质烟煤预测资源量合计占全国该煤类的 97.2%,其次是东北地区(赋存储量 658.73×10^8 t,占全国的 2.69%),其余分布在华南地区及云南和西藏。从各省(自治区)的赋存储量来看,最多的是陕西,占全国的 34.9%;第二是内蒙古,占全国的 27.9%;第三是新疆,占全国的 20.3%^[9]。

我国低变质烟煤不仅储量大,且煤质好。其中,大同的弱黏煤、神府和东胜的不黏煤,灰分低、硫分少,被誉为天然精煤。

1.2 低阶煤的主要特性

1.2.1 褐煤的主要特性

褐煤是煤化程度最低的一类煤。外观呈褐色到黑色,光泽暗淡或呈沥青光泽,含有较高的内在水和不同数量的腐植酸,在空气中易风化碎裂,发热量低,挥发分 $V_{daf} > 37\%$,且恒湿无灰基高位发热量不大于 24 MJ/kg 。根据其透光率 P_M (GB/T 2566—2010) 的不同,小于 30% 的称为褐煤一号;30% ~ 50% 的称为褐煤二号。褐煤一般作燃料使用,也可作为加压气化、低温干馏的原料,并可用来萃取褐煤蜡^[1]。

褐煤的最大特点是水分含量高,灰分含量高,发热量低。根据 176 个井田或勘探区统计资料,褐煤全水分高达 20% ~ 50%,灰分一般为 20% ~ 30%,收到基低位发热量一般为 $11.71 \sim 16.73 \text{ MJ/kg}$ ^[10]。

褐煤的主要性质和组成见表 1-7^[1]。

表 1-7 褐煤的主要性质和组成

序号	矿井和煤层名称	工业分析					反射率 $R_{\max}/\%$	元素分析/%					透光率 ^① $P_M/\%$	最高内在水 MHC/%
		$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$S_{t,d}/\%$	$Q_{gr,daf}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$		C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	O_{daf}		
1	梅河煤矿一井 12 层	8.20	6.83	44.72	0.37	30.19	0.431	73.39	5.66	1.84	0.40	18.71	32.0	14.29
2	山东黄县煤矿立井 1 层	4.21	9.32	47.51	0.65	29.32	0.542	72.69	5.89	1.82	0.70	18.90	28.6	22.39
3	扎赉诺尔矿务局露天矿	15.86	8.46	42.47	0.37	27.71	0.313	73.23	4.53	1.00	0.40	20.84	32.0	30.22
4	崇礼县煤矿 4 层	10.19	16.19	44.45	1.74	28.62	0.333	72.29	5.01	0.80	2.07	19.83	10.0	27.06
5	元宝山矿三斜井 4 层	8.77	7.29	43.70	1.63	29.44	0.482	73.71	5.30	0.75	1.76	18.28	26.8	18.21
6	阜新东梁煤矿二井上层	3.18	8.85	41.28	2.73	29.57	0.456	73.76	5.24	1.11	2.99	16.90	47.8	16.91
7	平庄西露天煤矿 1 层	10.73	8.02	42.25	1.30	28.44	0.365	72.11	5.26	1.05	1.41	20.17	17.5	20.42
8	舒兰东富煤矿二井 15 层	8.05	14.79	52.51	0.22	29.36	0.380	72.67	6.00	1.88	0.26	19.19	22.1	18.28
9	大雁矿务局一号井 1 层	16.27	14.09	45.32	0.54	28.12	0.480	71.42	5.23	1.49	0.63	21.23	19.6	28.81
10	吉林蛟河珥春北矿松林井 6 层	8.93	13.70	44.70	0.40	28.91	0.462	72.53	5.22	1.01	0.46	20.78	13.0	18.92
11	义马跃进矿	6.61	6.11	41.66	1.24	30.04	0.389	75.14	5.59	1.12	1.32	16.83	43.7	14.29

表 1-7 (续)

序号	矿井和煤层名称	工 业 分 析					反射率 $R_{\max}/\%$	元 素 分 析/ $\%$					透光率 ^① $P_M/\%$	最高内在水 MHC/ $\%$
		$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$S_{1,d}/\%$	$Q_{gr,daf}/$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)		C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	O_{daf}		
12	梅河煤矿二井 12 层	5.70	5.93	45.96	0.41	30.20	0.486	74.02	5.78	1.83	0.44	17.93	30.4	14.09
13	梅河煤矿三井 12 层	3.44	4.23	44.31	0.45	30.90	0.659	76.24	5.63	1.38	0.46	16.29	49.3	8.83
14	平庄古山煤矿二井 6~8 分层	7.72	5.58	43.25	1.07	41.65	0.437	73.86	5.50	1.26	1.14	18.24	32.5	17.22
15	云南濠浒七队	4.58	6.32	59.63	0.19	27.80	0.297	68.71	6.20	1.14	0.20	23.75	6.6	28.02
16	云南小龙潭	10.39	10.95	48.76	1.90	26.37	—	68.06	4.74	1.82	2.13	23.25	15.5	—
17	勐滨矿 K 层	15.10	6.67	47.80	0.42	28.32	—	71.38	4.97	0.81	0.45	22.39	22.0	—
18	舒兰六层	14.97	13.24	50.77	0.29	27.47	—	69.19	5.69	1.56	0.34	23.22	26.3	—
19	扎赉诺尔中层	10.65	5.78	46.30	0.32	27.58	—	70.09	5.12	1.38	0.34	23.07	28.7	—
20	元宝山矿 5~6 层	8.17	8.00	40.02	1.21	29.66	—	74.71	4.74	0.86	1.32	18.37	30.6	—
21	平庄古山二井 5 层	13.62	8.71	39.32	1.92	29.09	—	74.11	5.16	1.24	2.10	17.39	39.6	—
22	沈阳清水台 3 井	7.75	10.03	42.94	0.99	29.33	—	73.25	5.57	1.77	1.10	18.31	45.3	—
23	田东那读煤矿岩林井南一采区	9.73	9.25	44.86	1.17	29.70	0.528	73.55	5.53	2.08	1.29	17.55	44.6	17.28
24	云南可保煤矿五邑露天	6.98	7.79	56.53	0.78	27.45	0.314	68.50	5.92	1.56	0.85	23.17	12.2	36.10
25	小龙潭煤矿布沼坝坑	14.13	9.97	51.67	1.43	26.69	0.453	68.53	5.42	1.95	1.59	22.54	4.2	28.55
26	云南寻甸	11.79	13.60	61.80	0.68	27.52	0.289	67.79	6.04	0.92	0.79	24.46	11.7	29.89
27	甘肃永登县大有煤矿	8.74	11.31	48.55	4.21	30.19	0.380	73.59	5.36	0.89	4.74	15.42	44.8	19.68

注：① P_M 为用 72 型分光光度计在波长 475 nm 时测得的透光率。

1.2.2 次烟煤主要特性

次烟煤（低变质煤）包括长焰煤（CY）、不黏煤（BN）和弱黏煤（RN）^[1]：

（1）长焰煤（CY）是烟煤中煤化程度最低、挥发分最高（ $V_{daf} > 37\%$ ）、黏结性很弱（ $G < 35$ ）的一类煤。受热后一般不结焦，燃烧时火焰长为其特征，是较好的动力用燃料和气化及热解原料。

（2）不黏煤（BN）是煤化程度较低、挥发分范围较宽（ $V_{daf} > 20\% \sim 37\%$ ）、无黏结性或 $G \leq 5$ 的煤。在我国，这类煤的显微组分中由于有较多的惰质组，表现出没有黏结性，可用作燃料和气化及

热解原料。

(3) 弱黏煤(RN) 煤化程度较低, 挥发分范围较宽($V_{daf} > 20\% \sim 37\%$), 受热后形成的胶质体很少。由于这类煤的显微组分中惰质组含量较多, 黏结性微弱, $G > 5 \sim 30$, 介于不黏煤和 1/2 中黏煤之间。主要作燃料和热解及气化原料。

在我国, 低变质烟煤不仅资源量丰富, 而且这类煤灰分低, 硫分低, 发热量高, 可选性好, 煤质优良。各主要矿区原煤灰分均在 15% 以内, 硫分小于 1%。其中不黏煤的平均灰分为 10.85%, 平均硫分为 0.75%; 弱黏煤平均灰分为 10.11%, 平均硫分为 0.87%。根据 71 个矿区统计资料, 长焰煤收到基低位发热量为 16.73 ~ 20.91 MJ/kg; 弱黏煤、不黏煤收到基低位发热量为 20.91 ~ 25.09 MJ/kg。低变质烟煤化学反应性优良^[10]。

低变质烟煤的主要性质和组成见表 1-8^[1,11-18]。

表 1-8 低变质烟煤的主要性质和组成

序号	矿井名称	工业分析/%			元素分析/%					岩相组分(以有机质计)/%			最大平均 反射率 $R_{max}/\%$	煤类
		A_d	V_{daf}	$S_{t,i}$	S_{daf}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}	镜质组 V	惰质组 I	壳质组 E		
1	下花园	4.97	34.60	0.13	0.14	82.90	5.19	1.05	10.72	65.52	32.08	2.40	0.797	BN
2	大同王村	3.24	32.14	0.42	0.43	82.05	4.45	1.03	12.04	57.79	40.49	1.72	0.642	BN
3	大同云岗	3.73	24.33	0.20	0.21	85.18	4.51	0.87	9.23	23.58	75.71	0.71	0.842	BN
4	徐州旗山	6.93	36.22	0.39	0.42	83.23	5.32	1.38	9.65	75.59	16.51	7.90	0.842	RN
5	鸡西正阳	5.66	34.55	0.42	0.45	83.54	5.10	0.82	10.09	85.14	11.87	2.99	0.846	RN
6	鸡西二道河子	6.36	34.23	0.41	0.44	83.66	5.39	1.36	9.15	89.70	8.61	1.69	0.835	RN
7	坊子矿北井	11.57	34.02	0.55	0.62	83.58	4.95	0.85	10.00	68.11	29.34	2.54	0.844	RN
8	鸡西城子河	5.47	36.15	0.28	0.30	83.50	5.33	1.01	9.86	91.08	8.50	0.42	0.820	RN
9	准旗二道沟	4.64	39.63	1.48	1.55	80.58	5.25	1.14	11.48	71.75	22.99	5.26	0.578	CY
10	南票小凌河	6.43	41.62	0.77	0.82	81.11	5.52	1.14	11.41	70.60	20.24	9.16	0.647	CY
11	南票三家子	5.26	39.02	0.72	0.76	81.97	5.27	1.17	10.83	74.97	17.82	7.21	0.791	CY
12	双鸭七星矿	6.08	39.89	0.30	0.32	81.69	5.39	1.15	11.45	91.08	1.64	7.28	0.679	CY
13	辽源平岗	7.46	35.96	0.44	0.48	77.85	5.07	1.18	15.42	97.10	0.41	2.49	0.548	BN
14	窑街天祝	4.38	42.63	0.95	0.99	80.54	5.36	1.39	11.72	97.17	0.30	2.53	0.613	CY
15	广旺宝轮院	9.10	36.66	0.15	0.17	84.61	5.18	0.99	9.5	14.07	63.28	22.65	0.743	RN
16	靖远大水头	6.45	32.93	0.25	0.27	85.78	5.22	0.83	7.90	54.97	43.41	1.62	0.827	RN
17	靖远宝积山	4.84	34.44	0.25	0.26	84.19	5.23	0.80	9.52	64.97	33.60	1.43	0.849	RN
18	双鸭山矿东荣	9.07	39.12	0.19	—	81.87	5.35	0.82	11.67	—	—	—	—	CY
19	新疆伊宁	8.03	41.19	—	0.65	77.05	5.21	0.79	16.24	—	—	—	—	CY
20	东胜	3.36	39.81	0.39	—	79.21	4.73	1.08	—	78.9	19.9	1.2	—	CY
21	灵武	8.80	30.69	0.68	—	81.05	3.42	0.74	—	28.3	71.1	0.6	—	BN
22	大同	7.62	26.49	—	—	74.16	4.52	0.81	8.42	—	—	—	0.791	RN
23	东胜补连塔	3.36	39.81	—	0.4	81.05	4.13	0.96	13.46	—	—	—	—	CY
24	神木大柳塔	3.28	35.97	—	0.15	73.84	4.97	0.93	10.16	55.90	42.70	1.30	0.53	CY
25	神木大保当	3.16	38.44	—	0.34	74.84	4.99	1.38	10.78	56.50	42.40	1.10	0.51	CY

表 1-8 (续)

序号	矿井名称	工业分析/%			元素分析/%					岩相组分 (以有机质计)/%			最大平均 反射率 $R_{\max}/\%$	煤类
		A_d	V_{daf}	$S_{t,d}$	S_{daf}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}	镜质 组 V	惰质 组 I	壳质 组 E		
26	华亭新窑	13.83	34.68	—	—	—	—	—	—	36.5	48.3	1.4	0.610	BN
27	灵武枣泉	10.00	32.64	—	—	—	—	—	—	35.6	51.5	1.7	0.558	BN
28	靖远王家山	4.00	31.00	—	—	—	—	—	—	32.4	46.7	1.9	0.757	BN
29	靖远红会	5.48	33.27	—	—	—	—	—	—	30.5	35.9	3.0	0.766	BN
30	兰州阿干	2.79	29.91	—	—	—	—	—	—	28.7	57.2	1.7	0.767	BN

1.2.3 低阶煤结构特点

煤是以有机质为主, 并有不同相对分子质量、不同化学结构的一组“相似化合物”的混合物。它不像一般的聚合物, 是由相同化学结构的单体聚合而成的。因此构成煤的大分子聚合物的“相似化合物”被称为基本结构单元。也就是说, 煤是由许多的基本结构单元组合而成的大分子结构。基本结构单元包括规则部分和不规则部分。规则部分为基本结构单元的核部分, 由几个或十几个苯环、脂环、氢化芳香环及杂环(含氮、氧、硫)所组成。在苯核的周围连接着各种含氧基团和烷基侧链, 属于基本结构单元的不规则部分。

低阶煤的结构单元如图 1-1 所示^[19,20]。低阶煤变质程度较低, 碳氢含量低, 氧含量高, 结构单元芳核较小, 结构单元之间由桥键和交联键形成空间大分子, 侧链长且数量多, 孔隙率高。有些褐煤含有较高的活性基团, 一般为 15% ~ 30%, 且大部分以含氧官能团的形式存在, 只有少数氧在煤大分子结构中成为杂环氧。我国对 9 种褐煤的含氧官能团的测定结果见表 1-9。

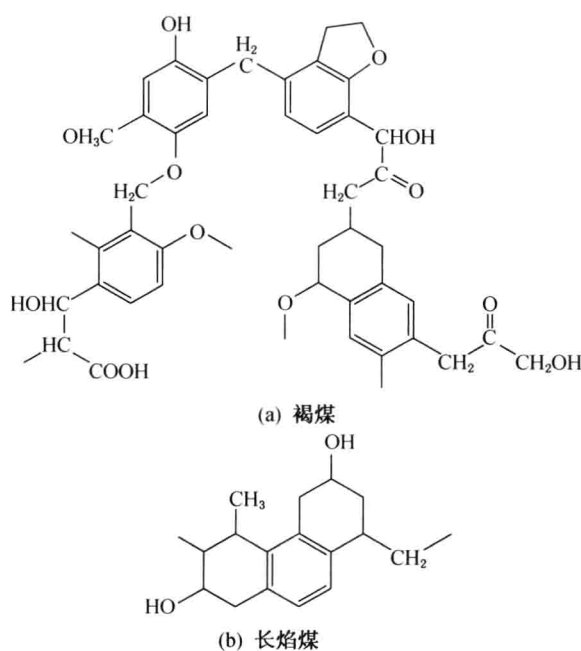


图 1-1 低阶煤的结构单元(或部分结构)模型