

苏俊◎主编

煤层气勘探开发 方法与[®]技术



石油工业出版社

煤层气勘探开发方法与技术

苏俊 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以山西沁水盆地煤层气勘探开发为依托,系统介绍了煤层气勘探开发方法与技术,内容包括煤层气地质、勘探、气藏工程、钻井工程、采气工程和集输工程等内容。

本书可作为从事煤层气勘探开发的科研人员和工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气勘探开发方法与技术/苏俊主编.

北京:石油工业出版社,2011.9

ISBN 978-7-5021-8412-4

I. 煤…

II. 苏…

III. ① 煤层-地下气化煤气-地质勘探

② 煤层-地下气化煤气-资源开发

IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 148647 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523585 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.25

字数:363 千字

定价:48.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《煤层气勘探开发方法与技术》

编 委 会

主 编：苏 俊

副 主 编：王瑞和 赵贤正

编 委：（按姓氏笔画排序）

毛志君 毛 琼 左银卿 石惠宁 田克忠

白建梅 司继伟 刘明生 刘建军 杜玉洪

杜维良 李 孟 李梦溪 李 辉 余 巍

汪 剑 张卫东 张永平 张建国 金学锋

周振永 郎淑敏 孟庆春 赵书俊 赵立宁

秦 义 袁文奎 袁孟雷 夏 健 郭 敏

郭 简 崔金榜 蒋海涛 焦双志 焦 勇

执行主编：赵书俊 张卫东

前 言

在长期的煤炭开采过程中,瓦斯(煤层气)被视为有害气体,部分高瓦斯矿井进行井下抽放,但并未从资源的角度加以开发和利用。20世纪70年代的石油危机使人们认识到油气资源的宝贵,美国率先把煤层气作为可以开发利用的资源进行研究。美国经过20世纪70年代和80年代初的潜心攻关,80年代中期就已实现了煤层气地面商业性开发。在退税政策的鼓励下,美国1998年煤层气产量已达 $324 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占本国当年天然气总产量的7%,形成了煤层气产业。加拿大、澳大利亚等国家纷纷以美国的煤层气产业为榜样,加大煤层气资源的勘探开发力度。到2006年,加拿大的煤层气产量就已达 $55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,澳大利亚的煤层气产量达 $18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,而美国当年煤层气产量已高达 $540 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。我国煤层气资源非常丰富,新一轮全国油气资源评价结果显示,埋深2000m以内的煤层气赋存区域的面积为 $37.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,煤层气地质资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占世界煤层气总资源量的13%,是继俄罗斯和加拿大之后的第三大煤层气资源国。借鉴国外先进的煤层气勘探开发技术发展我国煤层气产业,对缓解我国常规油气供应紧张状况、改善煤矿安全生产条件、保护大气环境、实施国民经济可持续发展等均具有十分重要的意义。

煤层气的开采一般有两种方式:一是煤矿井下抽采,二是地面开发。前一种方法主要是在煤炭开采前、开采过程或开采之后(采空区)进行本煤层、邻近层、采动区负压抽采,在世界范围内均较为成熟。2010年我国煤层气井下抽采总量超过 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计2015年井下抽采量将达到 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。后一种方法是美国20世纪80年代试验成功的类似常规油气的开采方式,是一种典型的规模化开发技术,从而使得煤层气产量取得突破性增长。美国探索成功的欠平衡钻井洞穴完井技术、多分支羽状水平井技术,澳大利亚开发成功的低成本U型井技术、V型井技术等,都有力地推动了煤层气地面开发技术的发展。我国积极引进、消化吸收国外先进的煤层气地面开发技术,“十一五”期间,我国煤层气地面开发产业有了跨越式发展:2007年产量达到了 $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,2008年达到了 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$,2009年达到了 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$,2010年突破 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。预计到2015年,我国煤层气地面开采量将达到 $(80 \sim 100) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

为促进煤层气产业的快速发展,中国石油华北油田分公司依托山西沁水煤层气田产能建设和承担的国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的“山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程”项目,编著了此书。本书系统介绍了煤的形成与演化、聚煤盆地、煤层气储层及煤层气的赋存规律。在此基础上,依次对煤层气勘探工程、气藏工程、钻井工程、采气工程、集输工程的原理与方法、工艺流程、特色技术进行了简明扼要的介绍,并以山西沁水盆地煤层气的勘探开发为依托,适时插入实例,详细介绍煤层气勘探开发特色技术。本书共分六章,第一章由张建国、刘建军、田克忠编写,第二章由汪剑、左银卿、焦双志编写,第三章由孟庆春、左银

卿、毛琼编写,第四章由袁孟雷、夏健、张卫东编写,第五章由秦义、白建梅、张建国编写,第六章由崔金榜、赵立宁编写。全书由赵书俊和张卫东统稿。

中国石油大学(北京)张遂安、中国地质大学(武汉)乌效鸣、西南石油大学梁海波、长江大学张公社、北京大学龚斌、斯伦贝谢张西坡等教授专家给予审稿并提出了大量建设性建议,中国石油大学(华东)抽调专人全程参与了本书的编写,在此一并表示感谢。

本书受到国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”中的“山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程”项目全额资助。

编 者

2011.7

目 录

第一章 煤层气地质	(1)
第一节 煤的形成与演化	(1)
第二节 聚煤盆地	(9)
第三节 煤层气储层	(19)
第四节 煤层气的赋存规律与成藏	(34)
第二章 煤层气勘探	(52)
第一节 煤层气勘探原理与方法	(52)
第二节 地震原理与方法	(58)
第三节 测井原理与方法	(65)
第四节 煤层气储量分级与资源计算	(78)
第五节 煤层气地质选区评价	(83)
第三章 煤层气气藏工程	(90)
第一节 煤层气水产出机理及产能影响因素	(91)
第二节 煤层气井型优选与井网布置	(104)
第三节 试井分析	(119)
第四节 煤层气储层数值模拟	(128)
第五节 煤层气开发方案编制	(137)
第四章 煤层气钻井工程	(142)
第一节 钻井原理与方法	(142)
第二节 煤层气钻井工艺流程及技术	(154)
第三节 井壁稳定与储层保护技术	(166)
第五章 煤层气采气工程	(182)
第一节 煤层气采气原理与方法	(182)
第二节 煤层气储层压裂	(190)
第三节 煤层气井排采工艺	(198)
第四节 煤层气田生产操作和管理	(207)
第六章 煤层气集输	(216)
第一节 煤层气的矿场集输工艺	(216)
第二节 计量仪表	(222)
第三节 华北油田沁水盆地数字化煤层气田集输系统	(226)
参考文献	(231)

第一章 煤层气地质

煤是植物遗体经过生物化学作用,又经过物理化学作用而转变成的沉积有机矿产,是多种高分子化合物和矿物质组成的混合物,是极其重要的能源和工业原料。煤在其形成过程中,同时形成了一系列的副产品,包括水和甲烷。这些甲烷大部分运移出煤层外,只有少部分残留在煤层中。残留在煤层中的甲烷只有少量以游离态存在,而大部分以单分子层的形式吸附在煤基的内表面。由于煤的内表面面积非常大,每吨煤在 $10 \times 10^8 \text{m}^2$ 以上,而且单分子层中甲烷分子堆积十分紧密,所以,煤层中拥有大量的甲烷。据测量,在沁水盆地的无烟煤中,甲烷的含量一般为 $8 \sim 25 \text{m}^3/\text{t}$,最高可达 $37 \text{m}^3/\text{t}$ 。因此,煤是一种极具潜力的储层,比相同体积的常规砂岩储层可以多储一两倍的天然气。如深度在 1000m、质量中等的煤层,其储气能力相当于孔隙度为 30% 的砂岩含水饱和度为 0 时的储气能力。煤层不仅储气性能好,也有充足的气源保证其充满气。随着从泥炭到无烟煤的转化,煤的级别升高,每吨煤能生成 $50 \sim 300 \text{m}^3$ 的甲烷,形成的甲烷量远远超过了煤层所能捕集的能力,过量的甲烷气将运移到上覆地层中。与以往勘探地质家主要寻找从煤层中逃逸出去的天然气不同,新兴的煤层气工业就是要采出仍保留在煤层中的甲烷气。

煤层气是指赋存于煤层中以甲烷为主要成分、以吸附在煤基质颗粒表面为主并部分游离于煤孔隙或溶解于煤层水中的烃类气体。煤层气是地史时期煤中有机质的热演化生烃产物。由于不同时期、不同学者从不同的角度给予不同的命名,最常见的有瓦斯、煤层甲烷等,本书统一命名为煤层气。由于煤层气涌入煤矿巷道或爆炸会引起灾难,因此煤炭工业界一直将煤层气视为灾害气体。由于翻译原因,我国煤炭工业界一直将涌入煤矿巷道内的煤层气称为瓦斯。事实上,煤矿瓦斯除 CH_4 组分外,还有采矿活动所产生的 N_2 、 CO_2 等空气组分以及 CO 、 SO_2 等气体组分。

煤层气勘探证实,不同聚煤盆地,同一盆地的不同构造单元,甚至同一构造单元的不同煤系地层中,煤层气分布特点也不同。尽管所有的煤层都蕴藏煤层气,但不是所有煤层的煤层气都具有商业开采价值。因此,煤层气比其他流体矿产分布特点更复杂,控制高产富集的因素更多,进而深化煤层气地质研究更重要。

第一节 煤的形成与演化

一、成煤作用

煤是一种固态的由沉积作用形成的可燃有机岩,是由地质历史时期的古植物遗体经过复杂的生物物理化学作用转变而形成的。古植物从遗体堆积到转变成煤的一系列演变过程,称为成煤作用。

植物界的发展、演化以及各类植物的兴盛衰亡必然影响着地史时期成煤特征的演化,植物

演化具有明显的阶段性,因此,成煤作用也就具有阶段性。成煤作用大致可分为两个阶段,见表 1-1。

表 1-1 成煤过程(陶昆等,2007)

成煤作用			原始物质及递变产物
成煤过程	第一阶段	腐泥化作用或泥炭化作用	
	第二阶段	煤化作用	成岩作用
			变质作用
			低等植物→腐泥→腐泥煤 高等植物→泥炭→褐煤→烟煤→无烟煤

1. 成煤作用第一阶段

成煤作用第一阶段称为腐泥化阶段或泥炭化阶段,主要发生于地表的泥炭沼泽、湖泊以及浅海滨岸地带,植物死亡后的遗体在各种微生物的参与下,不断地分解、化合、聚积。在这一阶段中起主要作用的是表生的生物地球化学作用,结果使低等植物转变为腐泥,高等植物则形成泥炭。

1) 腐泥化作用

腐泥化作用是在湖泊、沼泽水深地带及潟湖、海湾和浅海等水体中进行的,低等植物藻类和浮游生物遗体在滞流还原环境和厌氧微生物参与下,经过复杂的生物化学变化可形成富含水分的有机软泥。这个过程为腐泥形成的过程。

腐泥化作用的产物主要是腐泥。腐泥的原始物质、形成环境及演化过程与泥炭化作用不同。形成腐泥的原始物质主要是生活在水中的低等植物菌藻类和少量的浮游生物,以及异地成因的少量高等植物残体,还有一些水生动物及其排泄物。

现代腐泥的形成环境主要是湖泊,有时也形成于滞流的海湾、潟湖水体中。在地质历史中所形成的腐泥煤很少成层,而以夹层、透镜体存在于腐植煤层内,这与泥炭沼泽的形成和演化有关。

腐泥化过程中,形成腐泥的各种低等植物及其他生物遗体在滞流的较深水条件下和缺氧的还原环境中,受到厌氧细菌的作用,首先使在这种水深环境大量生存的低等植物体内脂肪和蛋白质发生分解(由于蛋白质分解造成的氮聚集起来形成了碱性环境)。这种作用不仅涉及含氮物质蛋白质的分解,也涉及无氮物质的分解和发酵。在厌氧细菌活动的作用下,因耗用有机质本身的氧,从而使植物物质内部发生分解。这种作用类似于分解蒸馏。分解后的物质,经过不断地缩合、聚合作用,形成一种富含水的棉絮状胶体物质,并经过脱水、压实等变化,最后转化成腐泥。

在腐泥化过程中,形成的气态产物主要有 CH_4 、 NH_3 、 N_2O 、 N_2 、 H_2S 和 CO_2 。与泥炭化作用类似,腐泥化作用除了对植物物质的生物化学分解外,还有原有植物物质的转化和新生有机物质的合成。这就是经分解后大量出现的富含氧的液态或固态沥青质物质,如脂肪酸和其他类脂化合物等,芳香族含量低,脂肪族含量高。

腐泥化作用的程度不同,形成腐泥的原始物质腐解程度也不尽相同,有的保存或部分保存原生的低等植物组织形态或结构,有的则被彻底分解,形成的腐泥煤显微组分的特征也不

相同。

腐泥是滞水湖沼中常见的一种沉积物,一般为黄色、暗褐色、黑灰色等。新鲜的腐泥含水可达70%~90%,干燥后含水量为18%~20%。形成于大湖泊中的腐泥,一般灰分含量较高,可达20%~30%;形成于森林沼泽、湖泊中的腐泥,灰分含量低。

2) 泥炭化作用

煤的泥炭化作用具体有以下几个方面:

(1) 泥炭化的生物化学变化。

泥炭化作用也是一种植物物质的生物化学作用,它与水解作用、氧化与还原作用有关。泥炭化作用的直接产物除了泥炭以外,还有二氧化碳、水、沼气和少量氮。通常认为,泥炭化过程的生物化学变化大致可分为两个阶段:一是生物化学分解阶段,植物残骸中的有机化合物经过氧化分解、水解,转化为简单的化学性质活泼的化合物;二是生物化学合成阶段,分解产物相互作用,进一步合成新的较稳定的有机化合物,如腐殖酸、沥青质等。

泥炭化作用的发生需要有植物遗体的堆积环境。植物有机体死亡后,经过生物化学作用,发生分解、合成与聚积,只有植物有机质堆积的增长量超过其分解量时,才有可能聚集成泥炭层。具备这样条件的场所就是沼泽。沼泽是地表土壤充分湿润、季节性或长期积水,丛生着喜湿性沼泽植物的低洼地段。通常泥炭沼泽的垂直剖面划分为氧化环境的表层、过渡条件的中间层、还原环境的底层。植物有机体的氧化分解和水解主要发生于泥炭沼泽的表层,因而又称为泥炭的形成层。在泥炭的形成和积累中,植物的根、茎、叶在根系尚未脱离矿质土之前不参与泥炭的形成,只有植物生长在泥炭层中时植物的地上部分和地下部分才一起参与泥炭的形成与积累(图1-1)。

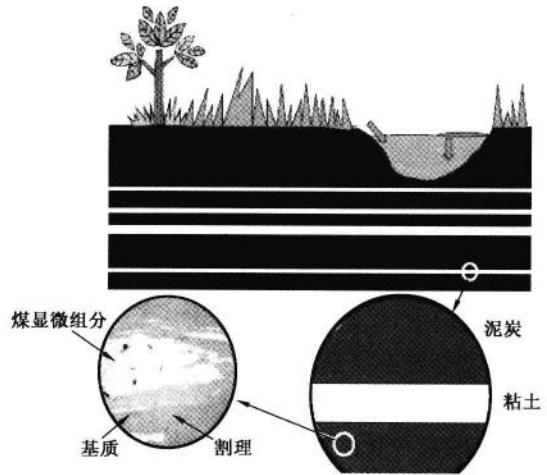


图 1-1 泥炭的沉积

泥炭的形成和积累,还取决于植物残体的分解强度。影响植物残体分解强度的因素主要有微生物的种类、数量、水热条件、土壤的酸碱度和有机质的组成等。

对于植物残体的堆积方式存在原地生成与异地生成的不同观点。原地生成说认为,造煤植物的残骸堆积于植物繁衍生存的泥炭沼泽内,没有经过搬运,在原地堆积并转变为泥炭;异地生成说认为,泥炭层形成的地方,即植物残体大量堆积的地方并不是成煤植物生长的地方,植物残体从生长地经过长距离搬运后,再在浅水盆地、潟湖、三角洲地带堆积而成,其依据是在现代的三角洲地带,常可见到从上游原始森林区带来的大量漂木,在湖泊中见到漂浮的泥炭层等。研究认为,原地与异地两种泥炭堆积方式都是存在的,且具有工业可采意义的煤层大都是原地成因的。

(2) 凝胶化作用。

植物物质在泥炭化过程中经受腐殖化作用后,继而将经历凝胶化作用。凝胶化作用是指植物的主要组成部分在泥炭化过程中经过生物化学变化和物理化学变化,形成以腐殖酸和沥青质为主要成分的胶体物质的过程。凝胶化作用是在沼泽中较为停滞的、不太深的覆水条件下,弱氧化至还原环境,在厌氧细菌的参与下,植物的水质纤维组织一方面进行生物化学变化,另一方面进行胶体化学变化,两者同时发生和进行,导致物质成分和物理结构两方面都发生变化。植物的木质纤维组织在沼泽水的浸泡下,吸水膨胀,并通过真菌和细菌的作用在形成腐殖酸等物质的同时,还经历着一个胶体化学变化过程。鉴于这一总过程既有因微生物活动而引起的化学成分的变化,又有胶体化学的变化,故凝胶化作用全称应为“生物化学凝胶化作用”。

由于凝胶化作用进行的强烈程度不同,因而产生了形态和结构不同的凝胶化物质。如果植物组织的细胞壁在变化过程中只发生了微弱的膨胀,则植物的细胞组织仍能保持规则的排列,细胞腔明显。变化到这种程度的植物组织,若因外界条件的改变其不再继续膨胀而被埋藏并转化成煤后,即形成凝胶化组分中的木煤体。如果植物细胞壁在变化过程中膨胀作用较强,细胞腔显著缩小或仅保存极小的空隙,则成为木质镜煤体的前身。若细胞腔也充满了凝胶化物质,但植物结构通过凝胶化物质深浅色调的不同仍可以辨认时,即转变成结构镜煤体。当凝胶化作用进行得十分强烈,植物的细胞结构完全消失时,形成了均匀的凝胶化物质,转变成煤后即成为无结构镜煤体。如果凝胶化的植物组织在介质中分散成细小的胶粒,即成为溶胶。溶胶的表面能较小,植物的其他组分,如孢粉、树脂、植物组织的碎片以及矿物颗粒都很容易落入其中,以后一旦介质条件发生变化,含有上述物质的溶胶即发生凝聚作用,形成凝胶状态,被埋藏后经过成岩作用脱水老化,转变成煤后即成为煤中的凝胶化基质体。凝胶化组分在煤化过程中容易产生内生裂隙和眼球状的表面特征,都是因凝胶脱水老化而产生的。

伴随着上述胶体化学的变化过程,植物组织同时进行着生物化学的分解、合成作用,并且不断地改变着植物残体的化学成分。因而在凝胶化作用过程中形成的不同产物不仅在形态上存在着区别,而且它们在成煤以后在化学工艺性质上也存在一些差异。凝胶化作用的程度不同,产生的凝胶化物质的结构和形态亦不同,再经过煤化作用的转化,则形成不同的显微组分。

(3) 丝炭化作用。

丝炭化物质和凝胶化物质一样,主要也是由植物的木质纤维组织转变而形成的,从有机组成来看主要也是植物细胞壁中的木质素和纤维素,但由于其变化条件和变化过程不同,因而形成了与凝胶化物质性质完全不同的物质。这些丝炭化物质的共同特点是碳含量高而氢含量低。由于丝炭化过程经历了较大程度的芳烃化和缩合作用,因而其反射率显著高于凝胶化物质。

丝炭化物质的形成主要是由于氧化作用和脱氢、脱水作用,它是在沼泽覆水程度起了变化,沼泽表面变得比较干燥,氧的供应较为充分的情况下发生的。氧化过程中有机物在微生物参与下,由于失去被氧化的原子因而脱氢、脱水,碳含量相对地增加。但是,这种氧化作用无限制继续并不能形成丝炭,这是因为氧化作用的持续发生将导致植物遗体的全部分解。只有当氧化到一定阶段后植物遗体迅速转入覆水较深的弱氧化以至还原条件下,或被泥沙所覆盖而与空气隔绝,中断了氧化作用,随后在煤化作用中才能转变成贫氢富炭的丝炭。

部分丝炭没有经过明显的凝胶化作用,因而植物细胞结构几乎未经膨胀变形,仍然保留完整的植物组织结构。还有一些丝炭化物质,首先曾经历了不同程度的凝胶化作用,而后由于环

境发生变化,又发生了丝炭化作用。因此,同一植物遗体可先后经历两种不同的转变过程,并形成相应的组分。那些已经经受不同程度凝胶化作用的植物组织,如果由于潜水面下降等原因,沼泽变得较为干涸,从而转入充分氧化的条件时,凝胶化的植物组织即因脱氢、脱水,相对地增碳而向丝炭化物质转化。这一转化过程如进行得彻底则可形成丝炭体、木质镜煤丝炭体等组分,凝胶化基质也可以变为丝炭化基质体;如果后期丝炭化作用进行得不彻底,则形成一系列过渡的产物,这些产物成煤后形成半凝胶化物质和半丝炭化物质的组分。但是已经经过充分丝炭化作用而形成的丝炭化物质,即使再经受适于进行凝胶化作用的不太深的覆水条件,也不能再发生凝胶化作用而形成凝胶化物质。因此,凝胶化物质一旦已完成了向丝炭化物质的彻底转化后就不可能再产生逆向的转化。

(4) 残植化作用。

当泥炭化过程中水介质流通较畅,在长期有新鲜氧供给的条件下,凝胶化作用和丝炭化作用的产物被充分分解破坏,并被流水带走,稳定组分大量集中的过程称为残植化作用,可以认为残植化作用是泥炭化作用中的一种特殊情况。

通过镜下研究,有时发现煤层的某些分层甚至整个煤层中稳定组分特别富集,角质体、木栓体、树脂体等物质有时可达到90%以上,引起人们对其富集原因的注意,因为在成煤植物中这些组分的比例本来是很低的,如在松柏类的植物中稳定组分仅占1%~3%。有人做过实验,稳定组分中含的大量孢粉素等组织不溶于任何有机溶剂,在无机酸和苛性碱作用下不起变化,只是在加热到200℃时才开始分解,说明孢粉素抵抗破坏的能力较强。水介质流通的森林沼泽里的植物遗体被强烈地氧化分解,其有机组成的大部分都遭受破坏。造成这种情况乃是由于流通的水造成了富氧条件,并使抑制喜氧细菌的毒素不断被排除而不能累积,这种情况下在沼泽底部富集了残留下来的稳定组分。除上述情况外,由于沼泽的潜水面下降,使植物物质不能被沼泽水覆盖而强烈氧化分解,其组成大部分被破坏掉,也可造成稳定组分的相对富集。显微镜下观察发现,稳定组分大量富集的情况下,煤的基质常以不透明的丝炭化基质为主,这一点也可作为氧化作用较强的证据。

残植化作用的产物经过煤化作用即成为残植煤。一些稳定组分含量很高的暗煤质的煤形成也多类似上述过程。

2. 成煤作用第二阶段

成煤作用第二阶段是煤化作用阶段。已形成的泥炭或腐泥,由于地壳沉降等原因被沉积物覆盖掩埋于地下深处,成煤作用就进入了第二阶段。在成煤作用的第二阶段中,起主导作用的是使煤在温度、压力条件下进一步转化的物理化学作用,即煤的成岩作用和变质作用:

1) 煤的成岩作用

泥炭形成后,由于盆地沉降,在上覆沉积物的覆盖下埋藏于地下,经压实、脱水、增碳作用,逐渐固结,经过物理化学作用转变成年轻的褐煤,称为煤的成岩作用。在成岩过程中,木质素和纤维素继续参与形成腐殖酸,已形成的腐殖质形成凝胶化组分。

2) 煤的变质作用

年轻的褐煤在较高的温度、压力和较长的时间作用下,进一步发生物理化学变化,变成褐煤、烟煤、无烟煤等过程称为煤的变质作用。在这个过程中,腐殖质不断发生聚合反应,稠环芳

香系统的侧链减少,芳构化程度提高,分子排列更加规则(翟刚等,2007)。

二、显微煤岩组分与煤阶的划分

1. 显微煤岩组分

显微煤岩组分主要是指植物遗体转变而成的有机显微组分,是在显微镜下可以区分和辨认的煤的基本组成成分。它按煤的成分和性质分为有机显微组分和无机显微组分两大类。有机显微组分是在显微镜下观察到的煤中由植物残体转变而成的显微组分,分为镜质组、壳质组、惰质组。无机显微组分是在显微镜下观察到的煤中的矿物质,分为粘土类、硫化物类、碳酸盐类、硫酸盐类、氧化物类等。

镜质组是由成煤植物的木质纤维组织,经腐殖化作用和凝胶化作用而形成的显微组分组,包括结构镜质体、无结构镜质体和碎屑镜质体等显微组分。由于部分镜质体吸附了类脂组降解物或镜质体中含大量超微类脂体,使镜质体更富氢,显示较强的荧光性。镜质组的芳香烃和氢的含量较高。在国际分类中,镜质组在煤中最常见,在大多数中其含量达65%~80%以上。它具有粘结性,热解时溶解并粘结惰性组分。

壳质组主要由高等植物的繁殖器官、保护组织及其分泌代谢产物、菌藻类、微生物降解物等形成的显微组分。壳质组的氢含量($>6\%$)和挥发分(50.0%~97.4%)一般较高,干馏时副产品也较其他两组多。它除树脂体外,大多具有粘结性。

惰质组由植物遗体主要经丝炭化作用转化而成的显微组分组,包括干馏过程中具有惰性、半惰性的显微组分,与其他两组显微组分相比,它的氢含量和挥发分最低,碳含量最高,反射率最高,热解时不会熔融(微粒体除外),没有粘结性,也不易液化。

由于成煤原始物质来源不同及它们在成煤过程中所处环境的差异,煤具有复杂的组分。煤的有机显微组分含量多少直接关系到煤层气的烃源条件。在煤化作用过程中,各种有机显微组分虽然都有一定的生烃能力,但由于不同显微组分的H/C和O/C原子比数不同,热解生烃的能力和成烃规律也有差异。

煤岩模拟实验等研究表明,在煤岩有机显微组分中,以壳质组生烃能力最强,镜质组次之,惰性组最差。由于煤一般以镜质组为主,含量常为壳质组的十多倍,因此煤系地层中的镜质组应是煤层气的主要贡献者。在吸附能力方面,镜质组的能力最强,其次是惰质组,壳质组最弱,这主要是由于镜质组中发育大量的气孔以及孔隙比表面积大所致。另外,从分子结构上分析,煤中镜质组具有更强的亲甲烷能力。因此,从煤的物质组成上看,镜质组和惰质组的含量越高,煤层气的含量也就越高。

2. 煤阶的划分

用数量表示的煤化过程程度或成熟度称为煤阶,即煤的“化学”变化阶段,或是煤变质系列中的阶段。煤阶又称煤级,表示煤化作用深浅程度的等级。煤阶有两种不同的称谓与层次:一种称为低煤阶煤、中煤阶煤及高煤阶煤;另一种按习惯形象且常用的称谓有褐煤、次烟煤、烟煤和无烟煤等。

“煤级”一词为D. E. 怀特于1926年首先提出。煤级与以碳百分比表示的煤在从褐煤至无烟煤系列中所处位置是一致的。煤级这一术语在国际煤岩学委员会1957年出版的《国际煤

岩学手册》中正式采用。煤级的确定借助于煤化作用参数或称煤级参数,即那些在煤化过程中变化明显的物理、化学和工艺性质,如碳含量、氢含量、发热量、挥发分、水分、X射线衍射和镜质体反射率等。不同显微组分的煤化轨迹不同是因为与其他显微组分相比,镜质组在煤中含量最丰富,杂质少,最纯净,易于剥离,并常在其他沉积岩中呈包体出现。重要的是镜质体反射率在较长的煤化阶段中其增长与煤级升高呈线性的正相关关系,受还原程度的影响也小。为了排除由于显微组分不同带来的影响,国际上一般以镜质组进行煤级研究。目前使用的显微光度计等精度高,测试数据准确,因此,镜质体反射率公认是最适宜的煤级指标。

镜质组发育的煤层,一般内生裂隙越发育,渗透率越高。通常用于确定煤阶的参数为“镜质体最大反射率”。镜质组分是煤中最常见、最重要的组分,含氧量高,碳和氢的含量居中,在我国大多数晚古生代煤中,镜质组含量在55%~80%以上。镜质体最大反射率指在显微镜下,于油浸及546nm波长条件下镜质组的反射光强度与垂直入射光强度的百分比,以 $R_{\text{omax}}(\%)$ 表示,其值随煤阶的增高而增加。划分煤的变质阶段推荐方案见表1-2。

表1-2 煤的变质阶段划分推荐方案

变质阶段		牌 号	$R_{\text{omax}}, \%$
褐煤	0		<0.5
烟煤	1	长焰煤	0.5~0.65
	2	气煤	0.65~0.90
	3	肥煤	0.90~1.20
	4	焦煤	1.20~1.70
	5	瘦煤	1.70~2.00
	6	贫煤	2.00~2.50
无烟煤	7	无烟煤3号	2.50~4
		无烟煤2号	4~6
		无烟煤1号	≥ 6

三、宏观煤岩组分和类型

煤是一种固体可燃有机岩,可以用研究普通岩石的方法来研究它,这就是煤岩学。用肉眼或借助于放大镜观察时,可分出不同的煤岩组分和煤岩类型,分别称为宏观煤岩组分和宏观煤岩类型。确定煤的宏观煤岩类型有助于初步评价煤质、分析煤的成因和进行煤层对比等。

1. 宏观煤岩组分

宏观煤岩组分又称肉眼煤岩组分。它是指腐殖煤中肉眼可以鉴别的四种基本煤岩组分,即镜煤、亮煤、暗煤、丝炭。其中,镜煤和丝炭是单一组分,亮煤和暗煤是复合组分。

镜煤由于光泽最强,接近玻璃光泽,因此称为镜煤。镜煤组分单一,多呈釉黑色,玻璃光泽,内生裂隙特别发育;性脆,结构均一;断口呈贝壳状。在煤层中呈透镜体或不规则薄层,厚度由几毫米到一两厘米,与其他煤岩组分的界限明显,比其他三种煤岩组分的挥发分和氢含量高,粘结性强。

亮煤为复合组分,内生裂隙发育;光泽较强,仅次于镜煤;层理隐约可见。在显微镜下观察,与暗煤相比,亮煤中的镜质组组分较多,壳质组组分较少,并常与暗煤逐渐过渡。亮煤的各种物理化学工艺性质多介于镜煤和暗煤之间。常以较厚层或透镜体出现,甚至构成整个煤层。

暗煤为复合组分,颜色黢黑,光泽暗淡,故名暗煤。暗煤致密坚硬,韧性较大,一般层理不清晰,有时为粒状结构,断面粗糙,具不规则或平坦断口。在显微镜下观察,常富含孢子、花粉的角质层等壳质组分;或含较多的惰质组组分;也可含大量矿物质,因此可分出不少的亚型。各亚型暗煤的物理、化学工艺性质不同,其中富含壳质组组分的暗煤用途较广。暗煤常以较厚分层出现,以至单独成层。

丝炭呈现丝绢光泽,组分单一,具纤维状结构,外表像木炭,因得名。丝炭色黑易染手,硬度小,矿化后硬度加大。丝炭的轮廓清楚,易于辨认,比其他三种煤岩组分的挥发分和氢含量低,碳含量高,不粘结。煤层中丝炭多呈扁平体或透镜状断续出现,一般厚一至数毫米。

2. 宏观煤岩类型

宏观煤岩类型又称肉眼煤岩类型。它是在肉眼观察时,按照同一变质程度煤的平均光泽强度所划分的类型。按平均光泽强度依次分为光亮(型)煤、半亮(型)煤、半暗(型)煤、暗淡(型)煤。宏观煤岩类型通常作为煤层分层的划分单位,分层厚度为3~10cm。影响煤的光泽强度因素很多,如煤岩组分的不同,矿物质的含量、风化程度以及挤压错动和破碎程度等,特别是煤的光泽随变质程度的加深而增强。例如,高变质半暗煤的光泽往往强于低变质半亮煤的光泽,因此划分煤的光泽岩石类型应以变质程度相同者做比较。

光亮(型)煤为光泽最强的宏观煤岩类型。条带状一般不明显,结构近于均一,但偶尔也夹有暗淡煤线条。内生裂隙发育,脆性大,机械强度小,易破碎,常具贝壳状断口。在显微镜下观察,光亮(型)煤一般含镜质组在80%以上,因而粘结性较强。

半亮(型)煤为光泽次强的宏观煤岩类型。由亮暗不同的煤岩组分交替成明显的条带状、透镜一条带状和线理一条带状结构,内生裂隙较发育,常具棱角状或不平坦状断口。在显微镜下观察,半亮(型)煤一般含镜质组在60%~80%。中变质阶段的半亮煤粘结性也较好,有时矿物质比光亮(型)煤多一些。

半暗(型)煤为光泽次暗的宏观煤岩类型。常具条带状和线理状结构,内生裂隙不发育,断口参差不齐;比较坚硬,比重较大。在显微镜下观察,半暗(型)煤一般含镜质组在35%~60%。当半亮(型)煤的灰分增加而使光泽减弱时也可成为半暗(型)煤。

暗淡(型)煤为光泽最暗的宏观煤岩类型。混有大量矿物质,层理不明显,质地坚硬,韧性大,密度大,多呈粒状结构,内生裂隙不发育,常具棱角状或参差状断口,通常为块状构造。在显微镜下观察,暗淡(型)煤镜质组含量<35%。在四种类型中,暗淡(型)煤中的矿物质含量往往最高,且多分散在基质中。

沁水盆地南部3号煤层宏观煤岩组分以亮煤、镜煤等为主,并有少量暗煤。煤岩类型以光亮(型)煤为主。显微组分以镜质组为主,其含量为86.5%~95.8%,而丝质组含量则为4.2%~13.5%。镜质组以均质镜质体为主,基质镜质体次之,含少量结构镜质体。矿物含量为3.7%~11.0%,以粘土为主。3号煤层中,往往含1~3层碳质泥岩、泥岩夹矸。依据电性特征,结合煤矿井下观察,樊庄区块煤岩结构具有三分特点,即上部块状煤、中部夹矸煤、底部构造煤。

第二节 聚煤盆地

在一定地史时期内发生聚煤作用的广大地区,在构造上表现为地壳长期缓慢沉降,在地形上是一个长期积水、利于植物生长和沼泽发育的洼地,这种地区称为聚煤盆地。聚煤盆地如经后期构造运动破坏,便分隔成一个或数个煤田、煤产地。煤田是指在同一地史发展过程中形成的含煤岩系,经后期改造保留下来的、比较连续分布的广大地区。煤产地是指煤田内由于构造而分隔的一些单独部分,或面积和储量均很小的煤田。

一、聚煤盆地的形成

在地质历史发展过程中,聚煤盆地的形成和聚煤作用的发生是古植物、古气候、古地理和古构造等条件综合作用的结果,在一定条件下,上述各种因素都可能成为制约聚煤作用的决定性条件。一般情况下,古植物、古气候条件提供了聚煤作用的物质基础,通常作为含煤沉积盆地形成的区域背景考虑,而古地理和古构造则是聚煤盆地形成、演化的主要控制因素。

植物的大量生长繁殖及其遗体的不断堆积是聚煤作用发生的物质基础。例如,虽在泥盆纪已有陆生植物出现,但当时植物形体矮小、数量有限,因而未能形成有工业价值的煤层;从早石炭纪开始,高大木本植物才大量生长、繁殖、堆积,形成了有工业价值的煤层。

在古气候条件方面,根据现代泥炭形成的气候条件可知,热带植物生长繁殖快,其遗体堆积后腐烂分解也快;寒带植物生长慢,腐烂分解也慢。它们虽都可以形成泥炭层,但相比之下,温暖潮湿的气候带最适于聚煤作用的发生。所以在相同时间内,温暖潮湿气候带形成的泥炭层厚度最大。

在古地理条件方面,以常年积水的庄地最宜于成煤。例如,滨海平原、三角洲平原、潟湖海湾、潮坪、河床两侧的河漫滩地带,以及各种大小不等且形状各异的山间及内陆盆地、死火山口湖、冰蚀洼地等,都有聚煤作用的发生。

在聚煤期古构造条件方面,泥炭层和含有泥炭层的一套沉积岩系,只有在地壳缓慢沉降的地区才能达到较大厚度并得以保存。这是因为聚煤作用的进行和泥炭层的增厚是十分缓慢的地质过程。一般认为,现代泥炭的堆积速度每年只有 $0.5 \sim 2\text{mm}$,那么,1m厚泥炭层的形成时间至少需 $400 \sim 500\text{a}$ 。按泥炭、褐煤、烟煤的压缩比(6:3:1)计算,1m厚的泥炭层只能形成不足20cm的烟煤。一个5m厚的煤层聚煤作用,至少也需持续万年之久。由此可知,强烈的构造活动是不利于聚煤作用持续进行。但必须指出,地壳运动过于缓慢同样也不利于聚煤作用进行,因为泥炭层的保存、增厚十分困难。

在控制聚煤盆地形成与聚煤作用发生的诸条件中,古构造条件起着主导作用。聚煤期古构造影响古地理条件的变化,除引起局部海水进退外,隆起和拗陷的产生及其位置和方向又决定着区域内山脉、水系的分布和走向,也控制了聚煤盆地产生的位置和方向;同时,强烈的地形分化又影响到古气候的分带性,进而波及古植物的生长、繁殖。沉积区不断下沉所形成的常年积水洼地,也为植物的大量繁殖提供了地貌和水文条件。陆源剥蚀区和聚煤盆地的相对升降运动,造成了两者相对高差的变化。这种相对运动的速度和幅度,又影响着聚煤盆地沉积和补偿的关系,进而影响到含煤岩系的岩性、岩相、厚度和含煤性。煤层和其他沉积岩层的出现及

它们的厚度,主要取决于聚煤盆地基底沉降速度与植物遗体 and 无机物沉积补偿速度之间的相互关系。

一般来说,煤田地质领域所称古构造是以聚煤期来划分的。发生在聚煤期以前和聚煤期的构造,分别称为聚煤期前古构造和聚煤期古构造;发生在聚煤期以后的构造,则称为聚煤期后构造。为区别于聚煤期后构造,对于聚煤期前和聚煤期发育的宽缓开阔的褶皱,习惯上不称背斜、向斜,而称隆起、拗陷。

聚煤期前古构造,通常表现为聚煤盆地基底构造,即聚煤盆地发育在基底构造之上,属于拗陷范围内,且周围隆起区常成为物源区;聚煤期古构造常表现为聚煤盆地内在聚煤过程中隆起、拗陷的分化和同沉积构造的存在,它对含煤岩系的形成和聚煤作用起着重要的控制作用;聚煤期后构造是含煤岩系形成之后而活动的构造,只对煤系的赋存有影响。聚煤期前古构造、聚煤期古构造、聚煤期后构造三者间的关系可具继承性,或不具继承性。

以山西沁水盆地南部石炭二叠系煤系沉积特征、聚煤模式、主煤层岩相古地理及聚煤特征来看,该区太原期沉积厚度一般为 70 ~ 110m,由东向西、由南向北厚度减薄。太原期沉积了 3 ~ 6 层灰岩,其中发育稳定的共 5 层($K_2 \sim K_6$),总厚为 12 ~ 24m,区域上南厚北薄,表明海侵主要来自东南方向,以碳酸盐岩台地—障壁岛、潟湖、潮坪沉积为主。山西期沉积厚度一般为 40 ~ 80m,中—北部厚度大,南部小(图 1-2)。总的古地理格局是南部靠海,北部靠陆,物源区在北部,以三角洲前缘—分流间湾沉积为主。

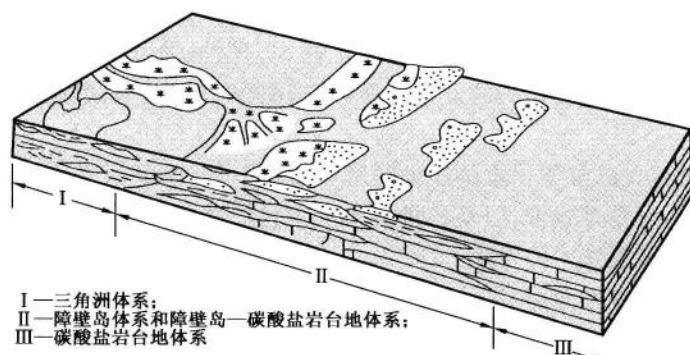


图 1-2 沁水盆地南部太原、山西组成煤模式图(王红岩等,2005)

该区有泥炭沼泽和泥炭坪两种聚煤环境。泥炭沼泽聚煤作用主要发育在山西组,其成煤环境主要为三角洲平原沼泽,常由三角洲平原相中有关亚环境进一步演变而成。泥炭坪聚煤作用主要发育在太原组。泥炭坪系指潮间坪、潮上坪,包括部分局限潮下浅水带和潮沟,在适宜条件下可生长大量红树或类红树生态的适盐植物,而造成大面积泥炭堆积。它可以发育在受潮汐影响的各种环境。沁水盆地南部泥炭坪成煤环境可划分为潟湖泥炭坪、堡岛泥炭坪、潮汐三角洲泥炭坪、碳酸盐岩台地泥炭坪、分流间湾泥炭坪等五种类型的成煤环境。泥炭坪成煤的主要特点是煤层分布广、层位稳定、硫含量高、厚度变化大、煤层多为复杂结构。

泥炭坪和泥炭沼泽是两种性质不同的成煤环境。伴随着海平面在时空上的演化,聚煤条件可以相互转化替代,聚煤范围也可不断扩大。

该区主要煤层是太原组 15 号煤和山西组 3 号煤。煤全区广布,由于太原期海侵来自东