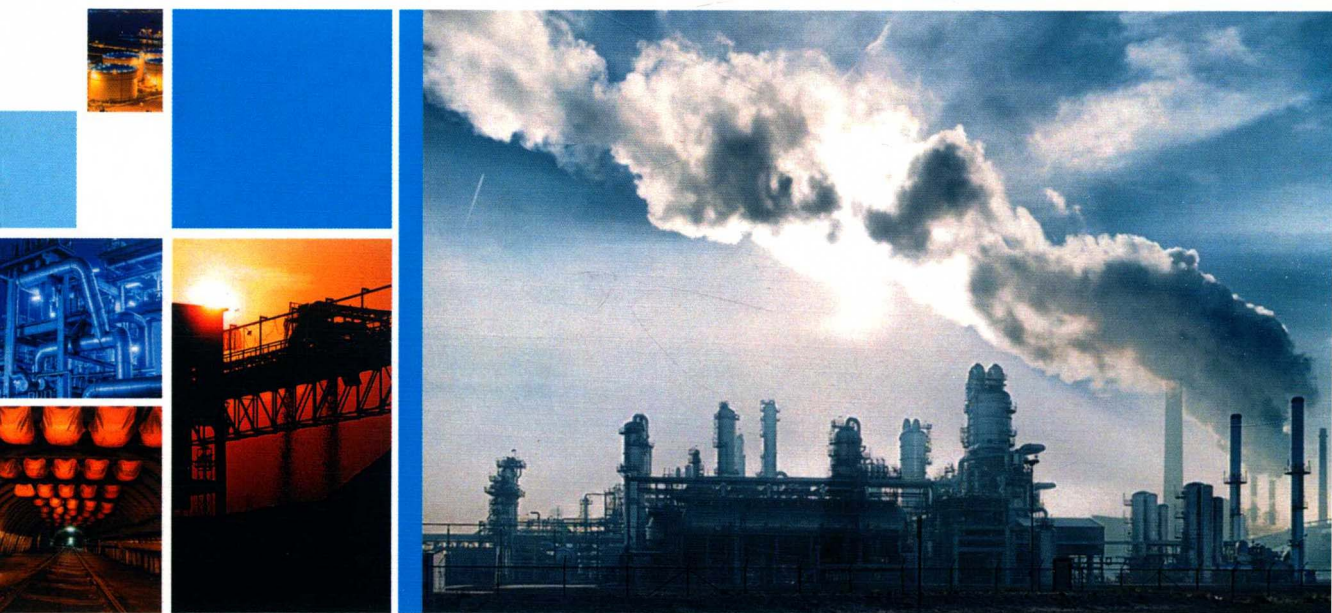


中国煤层气产业 发展研究

牛冲槐 张永胜◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

中国煤层气产业发展研究

牛冲槐 张永胜 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

中国煤层气产业发展研究/牛冲槐, 张永胜著. —北京: 知识产权出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5130-3998-7

I. ①中… II. ①牛… ②张… III. ①煤层—地下气化煤气—产业发展—研究—中国

IV. ①F426. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 001709 号

内容提要

本书在国家软科学重大项目“山西建设国家煤层气产业化示范基地战略研究 (2011GXS2D017)”“山西省一级学科博士点特色重点学科项目 (晋教材 [2013] 289 号)”“山西省教育厅高校人文社科重点研究基地项目”等项目资助下, 主要针对中国煤层气资源的状况, 在煤层气产业化开发的特征、背景和必要性分析的基础上, 从国内外煤层气产业发展的现状入手, 围绕煤层气需求量预测、煤层气产业化开发效益分析和风险分析等开展研究。本书共分十章: 第一、二、三、四、十章由牛冲槐编写, 第五、六、七、八、九章由张永胜编写。

责任编辑: 刘晓庆 于晓菲

责任出版: 孙婷婷

中国煤层气产业发展研究

ZHONGGUO MEICENGQI CHANYE FAZHAN YANJIU

牛冲槐 张永胜 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

电 话: 010-82004826

社 址: 北京市海淀区西外太平庄 55 号

责编电话: 010-82000860 转 8363

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

字 数: 380 千字

网 址: <http://www.ipph.cn>

<http://www.laichushu.com>

邮 编: 100081

责编邮箱: yuxiaofei@cnipr.com

发行传真: 010-82000893/82003279

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 18.25

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

ISBN 978-7-5130-3998-7

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

目 录

第 1 章 煤层气概论	1
1.1 煤层气的定义	1
1.2 煤层气藏的定义与成因	1
1.3 煤层气的保存条件	10
1.4 煤层气的赋存状态	13
1.5 煤层气资源的特点	15
1.6 煤层气的储层特征	17
1.7 煤层气的运移及产出机理	20
1.8 煤层气储层参数的测定方法	26
1.9 煤层气与天然气和页岩气的关系	27
1.10 煤层气勘探开发技术	29
1.11 煤层气开发基本模式	32
1.12 煤层气的主要用途	34
第 2 章 煤层气产业化示范基地的特征	37
2.1 煤层气产业化概念	37
2.2 煤层气产业化的要求	40
2.3 煤层气产业化示范基地的特征	42
第 3 章 煤层气产业化开发的背景与必要性及其可行性	46
3.1 背景	46
3.2 必要性	54
3.3 可行性	59

第 4 章 国际煤层气市场分析 76

4.1 国际煤层气产业发展概况 76

4.2 国际煤层气产业市场分析 91

第 5 章 中国煤层气产业发展状况分析 99

5.1 中国煤层气资源状况 99

5.2 中国煤层气勘探开发利用现状 114

5.3 中国煤层气产业化发展模式 128

5.4 中国煤层气发展实现产业化面临的障碍 134

5.5 中国煤层气产业发展规划及相关政策 137

5.6 中国能源市场发展趋势 146

5.7 中国煤层气市场需求预测及分析 151

第 6 章 山西省煤层气产业发展状况分析 162

6.1 山西省煤层气资源概况 162

6.2 山西省煤层气产业发展状况分析 169

6.3 山西省煤层气产业化发展的有利条件 174

6.4 山西省煤层气开发利用模式 176

6.5 山西省煤层气产业发展规划与发展政策 177

6.6 山西省煤层气产业发展存在的问题 184

6.7 山西省煤层气行业市场预测及其分析 187

第 7 章 煤层气产业化开发的发展规模、费用核算及不确定性分析 195

7.1 煤层气产业发展规模预测 195

7.2 煤层气产业化开发示范基地的费用核算分析 201

7.3 煤层气产业化中不确定因素分析 204

第 8 章 煤层气产业化开发效益分析 210

8.1 气藏工程 210

8.2 开发方案部署 234

8.3 煤层气开发项目的直接费用估算 240

8.4 煤层气开发项目的直接效益 253

8.5 财务盈利能力分析 254

8.6 煤层气开发项目的经济性分析 255

8.7 社会效益分析	258
第 9 章 煤层气产业化开发风险分析	262
9.1 煤层气行业内部风险分析	262
9.2 煤层气行业外部风险分析	266
第 10 章 可行性研究结论与建议	272
10.1 我国煤层气产业发展中存在的问题	272
10.2 促进我国煤层气产业发展的对策及建议	276
参考文献	282

第 1 章 煤层气概论

1.1 煤层气的定义

煤层气俗称煤层甲烷或煤矿瓦斯，是地史时期煤演化过程中煤中有机质在煤化作用过程中生成的，是赋存于煤层及其围岩中的与煤共伴生的自生自储的吸附态为主的非常规天然气。它是以吸附在煤基质颗粒表面为主、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体。煤层气的组成一般以甲烷（ CH_4 ）（包括 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 等部分重烃）为主，还有二氧化碳（ CO_2 ）、氮气（ N_2 ）等空气组分和一氧化碳（ CO ）、二氧化硫（ SO_2 ）等气体组分，以及氦、氡等稀有气体，也可以说煤层气是气体化合物与气体元素组成的混合体。

目前，我国关于煤层气定义的说法有三种，主要依据是煤层气的成因、赋存、组成和矿种划分。

第一种说法：煤炭工业界将煤层气定义为煤的共伴生资源，通常称为“煤矿瓦斯”，主要根据煤层气的成因（煤层气与煤炭共伴生）和赋存特点（煤层气赋存于煤层之中），以及资源价值（煤炭资源具有凸显的资源价值主导地位）而言。

第二种说法：石油天然气工业界认为煤层气资源的气体组分甲烷与常规天然气相同，所以将煤层气称为“非常规天然气”（Unconventionality Natural Gas）。主要依据是煤层气独特的赋存状态（以吸附态为主）、非常规储层（典型的自生自储、多重孔渗的有机储层）和特有的产出机理（排水—降压—解吸—采气）。

第三种说法：国土资源部门认为煤层气是赋存于煤层中的独立的矿产资源，通常称为“煤层气”。主要依据是把煤层气作为一种独立的矿种，与煤炭、石油等同。

1.2 煤层气藏的定义与成因

1.2.1 煤层气藏的定义

煤层气藏是在压力封闭作用下，吸附煤层气达到相当数量的煤岩体或煤层，是煤层

气聚集和煤层气勘探开发的基本地质单元。煤层气藏的成藏要素主要包括煤层条件、压力封闭和保存条件。煤层条件是煤层气藏形成的物质基础，压力封闭是煤层气藏的必要条件，保存条件是煤层气藏从形成到现今能够存在的前提。

煤层气与煤是自体共生、共存的伴生矿藏，仅是赋存状态不同。含煤盆地不一定是煤层气盆地，现今保存的含煤盆地不一定都赋存可供开采的煤层气，只有能够形成煤层气藏的含煤盆地才能称为煤层气盆地，才含有煤层气。煤层形成煤层气藏需要具有较高的含气量、较好的渗滤性能和完善的封盖条件。

煤层气藏与常规天然气不同，煤层气属于典型的自生自储的非常规天然气资源。煤层既是煤层气的源岩，煤在演化和变质过程中产生大量的气体，一部分气体保留在煤层中，又是煤层气的储集层，煤层中的孔隙和裂隙为煤层气的赋存提供了空间，同时也为其运移提供了通道。

1.2.2 煤层气的成因

1. 煤层气形成的地质背景

煤田勘探和煤层气勘探的实践证明，煤层气及其储层特性变化无常。因此，确定研究区域煤层气勘探、开发前景时，首先要对这一地区的区域地质背景资料进行分析，了解含煤地层的沉积特点及横纵向分布规律和构造发育基本情况，研究煤的生气、储气能力，热演化特点，煤层气的分布规律及保存条件。进行沉积作用分析的目的是了解煤层气分布、物理性质、显微组分、孔隙结构及封盖性，确定主力煤层和可采煤层气的分布特点。进行构造分析的重点是认识构造作用在煤变质生气作用、成藏条件、水文地质条件、渗透性等方面产生的影响及其对煤层气高富集的控制因素。

煤的生成过程是一个漫长的复杂热演化过程，煤层中的甲烷主要是由低煤阶向高煤阶转化过程中生成的热解气。随着煤的热演化程度的加深，煤阶持续增高，生气量急剧增大，达到一定程度开始消亡。因此，镜质组反射率 R_0 大于 4% 的高煤阶和镜质组反射率 R_0 小于 0.35% 的低煤阶生气量很少。煤中显微组分含量直接影响生气量的大小，据热模拟成烃实验得知，壳质组产气能力强，镜质组次之，惰质组较差，三者比例为 1.5 : 1.0 : 0.7。经煤层对甲烷的吸附实验，煤岩显微组分不同，对甲烷的吸附量也不同。在中等变质程度的煤中，镜质组的吸附量高于其他类型，特别是镜质组一般割理发育、物性好、吸附气量大。

沉积于三角洲环境或大型内陆浅沼环境的煤系地层具有厚度较大、横向连续性较好、分布广泛、镜质组含量相对高、直接盖层和间接盖层都发育较好等特点，对煤层气的形成和保存十分有利。而沉积于河道、海湾、湖等开放水系沉积区的煤层一般不规则，横向不连续，镜质组含量相对较低，盖层条件相对较差，不利于煤层气的生成和

富集。

成煤前后的构造运动对煤层气的生成、富集成藏、保存有着重要的影响。一般认为,成煤前的构造背景对成煤规模、煤层分布、煤的热演化影响较大;成煤后期的构造运动尤其是最后一次构造活动,决定了聚煤盆地现今基本面貌和煤层气分布特征,对煤层气高产富集控制极为明显。分析聚煤盆地的构造形态是寻找埋藏适中的成熟含煤层系、宏观了解储层物性的重要手段之一,褶皱、褶曲、断层的分布特点直接影响了煤储层物理性质、煤层厚度、煤阶和气体运移及煤层气藏的形成;煤层割理、裂缝的发育程度是进一步评价煤储层物性的重要手段之一。

另外,聚煤区水文地质条件对煤层气富集成藏和保存影响较大。大气淡水可携带大量细菌与煤层进一步作用,生成生物成因气或生物降解气。

2. 煤化作用

煤是由植物残骸经过复杂的生物化学作用和物理化学作用转变而成的,这个转变过程称为植物的成煤作用,即原始煤物质最终转化为煤的全部作用。一般认为,成煤过程分为两个相继的阶段:泥炭化阶段和煤化阶段。从成煤原始物质的堆积,经生物化学作用直到泥炭的形成,称为泥炭化作用阶段;当泥炭形成后,由于沉积盆地的沉降泥炭被埋藏于深处,在温度、压力增高等物理化学作用下,形成褐煤、烟煤、无烟煤和变无烟煤的过程,称为煤化作用阶段。前者主要是生物化学过程,后者主要是物理化学过程。

在泥炭化阶段,植物残骸既分解又化合,最后形成泥炭或腐泥。泥炭和腐泥都含有大量的腐植酸,其组成和植物的组成已经有很大的不同。对于腐泥来说,则经历了硬腐泥、腐泥褐煤、腐泥亚烟煤、腐泥烟煤到腐泥无烟煤的煤化作用。

煤化阶段包含两个连续的过程,即成岩作用阶段和变质作用阶段。

煤与岩石的成岩作用与变质作用不完全等同,主要是因为煤是一种可燃有机岩石,对于温度、压力变化的反应比无机沉积物敏感得多,所以沉积物的成岩与变质作用一般要滞后于煤。煤的物理、化学煤化作用表现为煤级和煤的成熟度的变化,是低程度变质作用在有机岩石中的一种表现形式。

第一个过程是煤的成岩作用阶段。泥炭形成后,由于盆地沉降,在上覆沉积物的覆盖下,泥炭被埋藏于地下,在地热和压力的作用下,经压实、脱水、增碳作用,游离纤维素消失,出现了凝胶化组分,泥炭逐渐固结并具有了微弱的反射力,经过这种物理化学变化转变成年轻褐煤。褐煤的密度比泥炭大,在组成上也发生了显著的变化,碳含量相对增加,腐植酸含量减少,氧含量也减少。因为煤是一种有机岩,所以这一转变所经历的作用称为煤的成岩作用。一般认为这种作用大致发生于地下200~400米的浅层。

第二个过程是煤的变质作用阶段,也就是褐煤转变为烟煤和无烟煤的过程。地壳继

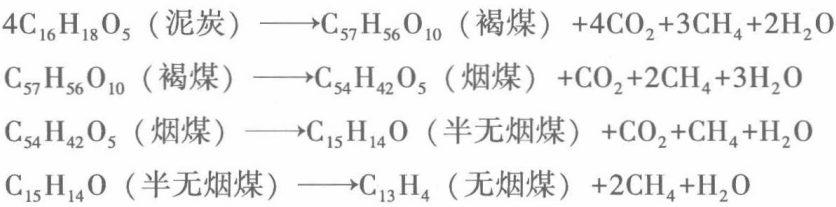
续下沉，褐煤的覆盖层也随之加厚，年轻褐煤在地热和静压力以及较长地质时间等因素的作用下，继续经受着物理化学变化而被压实、失水，其内部组成、结构和性质都进一步发生变化，这个过程就是褐煤变成烟煤的变质作用。这一阶段所发生的化学煤化作用表现为腐殖质进一步聚合，失去大量的含氧官能团，腐植酸进一步减少，使腐殖质由酸性变为中性，出现了更多的腐殖复合物。这一阶段，物理煤化作用表现为结束了成岩凝胶化作用，形成凝胶化组分。烟煤比褐煤碳含量增高，氧含量减少，腐植酸在烟煤中已经不存在了。烟煤继续进行着变质作用，由低变质程度向高变质程度变化，从而出现了低变质程度的长焰烟、气煤，中等变质程度的肥煤、焦煤和高变质程度的瘦煤、贫煤。它们之间的碳含量也随着变质程度的加深而增大。

由于有机质的基本结构单元主要是带有侧链和官能团的缩合稠环芳烃体系，碳元素主要集中于稠环中。稠环的结合力强，具有较大的稳定性。侧链和官能团之间及其与稠环之间的结合力相对较弱，稳定性差。在成煤过程中，温度和压力至关重要。

温度对于在成煤过程中的化学反应有决定性的作用。随着地层加深，地温升高，煤的变质程度就逐渐加深。高温作用的时间愈长，煤的变质程度愈高；反之则相反。在温度和时间的同时作用下，煤的变质过程基本上是化学变化过程。在其变化过程中所进行的化学反应是多种多样的，包括脱水、脱羧、脱甲烷、脱氧和缩聚等。

压力也是煤形成过程中的一个重要因素。随着煤化过程中气体的析出和压力的增高，反应速度会愈来愈慢，但能促成煤化过程中煤质物理结构的变化，能够减少低变质程度煤的孔隙率、水分和密度。

在煤化过程中，随温度及压力的增加，侧链和官能团不断发生断裂和脱落，数目减少，缩合芳香核的数目不断增加，并伴随大量烃类（主要是甲烷）的生成，即形成各种挥发性产物，如二氧化碳、水、甲烷等。煤由低煤阶向高煤阶转化过程的化学反应如下：



3. 煤级指标

由于煤化作用是一个复杂的过程，在不同煤化阶段中各种指标变化也是各不相同。经勘探实践证明，不同煤阶煤层气藏在煤层气成因、储层物性、成藏过程等方面存在很大差异。特别是不同煤阶煤层气吸附、解吸特征的差异影响煤层气的聚集成藏、解吸、渗流、产出的全过程。一定煤化阶段具有不同的煤化指标，如水分、发热量、挥发分、镜质组反射率等，这些煤级指标随着煤化程度的增加具有规律性的变化，见表 1-1。

表 1-1 常用煤级指标在不同煤级的变化

煤级指标（镜煤样）	测值变化范围			
	设计生产能力 Q_d 褐煤	低煤级烟煤	高深级烟煤	无烟煤
水分 M_{ad} (%)	28~5	<5~11	1	1~2
挥发分 V_{daf} (%)	63~46	<46~24	<24~10	<10~2
碳含量 C_{daf} (%)	60~75	>75~87	>87~91	>91~96
氢含量 H_{daf} (%)	7~6	<6~5.6	<5.6~4	<4~1
发热量 $Q_{daf,gt}$ (MJ/kg)	16.7~29.3	>29.3~36.17	≥36.17	≤36.17
折射率 N_{max}	1.68~1.732	>1.732~1.859	>1.859~1.94	>1.94~2.058
吸收率 K_{max}	0.01~0.027	>0.027~0.077	>0.077~0.13	>0.13~0.351
反射率 R_{max}^o (%)	0.28~0.5	>0.5~1.5	>1.5~2.5	>2.5~6.09
R_{max}^a (%)	6.4~7.2	>7.2~9.4	>9.4~11.5	>11.5~16.55
双反射率 ($R_{max}^o \sim R_{max}^a$) /%	0	0	0~0.5	>0.5~5
X 射线衍射面网间距 (d_{002} 0.1nm)	4.1907~4.0401	4.0401~3.5341	3.5341~3.476	3.476~3.4269

资料来源：孟召平．煤层气开发地质学理论与方法，2010.

在煤层气地质研究中煤的挥发分产率和镜质组反射率是最常用的两个煤级指标，其中又以反射率应用效果最好。煤的镜质组反射率是国际上公认的较理想的煤化程度指标，尤其在烟煤阶段，能直接地反映煤系物质的生烃过程。煤的镜质组反射率是指煤抛光表面在垂直反射时，反射光强度和入射光强度的百分比，一般用 R_0 表示：

$$R_0 = \frac{r \text{ (反射光强度)}}{I \text{ (入射光强度)}} \times 100\%$$

我国各煤种煤的镜质组最大反射率的变化范围如表 1-2 所示。

表 1-2 我国各煤种煤的镜质组最大反射率变化范围

煤级	褐煤	长焰煤	气煤	肥煤	焦煤
R_{max}^o (%)	<0.50	0.50~0.65	0.65~0.90	0.90~1.20	1.20~1.70
煤级	瘦煤	贫煤	无烟煤		
			三号	二号	一号
R_{max}^o (%)	1.70~1.90	1.90~2.50	2.50~4.0	4.0~6.0	>6.0

资料来源：孟召平．煤层气开发地质学理论与方法，2010.

另外，不同的显微组分对成气的贡献不同，王少昌等对低煤阶煤显微组分的热模拟

实验结果表明,壳质组、镜质组、惰质组的最终成烃效率比约为 3.3 : 1.0 : 0.8,傅家谟认为,在相同演化条件下,惰质组产气率最低,镜质组是惰质组的 4.3 倍,壳质组为惰质组的 11 倍,并产出较多的液态烧烃。

4. 成煤期的划分

当地球处于不同地质年代,随着气候和地理环境的改变,生物也在不断地发展和演化。植物从无生命一直发展到被子植物,这些植物在相应的地质年代中造成了大量的煤。在整个地质年代中,全球范围内有三个大的成煤期。

一是古生代的石炭纪和二叠纪,成煤植物主要是孢子植物。主要煤种为烟煤和无烟煤。

二是中生代的侏罗纪和白垩纪,成煤植物主要是裸子植物。主要煤种为褐煤和烟煤。

三是新生代的第三纪,成煤植物主要是被子植物。主要煤种为褐煤,其次为泥炭,也有部分年轻烟煤。

5. 中国主要的成煤时代及聚煤地

在世界三个大的成煤期,中国都有煤层聚集。中国主要成煤时期为石炭—二叠纪、侏罗纪;最重要的聚煤期有 7 个,分别为华北石炭—二叠纪、华南二叠纪、晚三叠纪、西北早—中侏罗世、东北晚侏罗—早白垩世以及东北、西南及沿海第三纪。其中,早、中侏罗世聚煤期煤炭资源量占全国煤炭资源总量的 60%,华北石炭—二叠纪聚煤期煤炭资源量占全国煤炭资源总量的 26%。

中国聚煤的具体时期分布如下。

石炭纪的聚煤时期对我国煤系形成影响很大,尤其在晚石炭纪,形成了华北、华东及中南地区的煤系,山西、河北地区的大矿区(如西山、开滦、阳泉、晋城、潞安、汾西等)都属该煤系。早石炭纪含煤地层自西面向东北显示出层位抬高的时迁现象。晚石炭纪地球上出现了明显的植物地理分区,我国主要属于华夏植物地理区。华北石炭纪含煤地层包括中石炭世本溪组和晚石炭世太原组。其中,本溪组以辽宁本溪组发育较全;华北聚煤盆地绝大部分属于晚石炭世太原组。太原组以山西地层剖面为代表,一般以东大窑灰岩的顶界面作为太原组与山西组的分界,太原组含重要可采煤层,是一个海进沉积序列,由北而南灰岩层数增多,层位偏高。西北地区东部,在相当于西欧韦宪阶的臭牛沟组之上划分出靖远组,以与西欧的纳缪尔阶相对比,靖远组含有薄煤层。

二叠纪的早二叠世和晚二叠世都有较强的聚煤作用,早二叠世主要是华北广大地区,早期聚煤以山西组含煤地层为代表,形成了以华北为中心的山西组煤系,晚期聚煤以石盒子组含煤地层为代表,仅限于华北地区南部,华南地区的聚煤作用东南沿海发生早,西南地区发生晚,显示由东南向西北推移扩展的趋势;晚二叠世形成华南地区最重

要的含煤地层，其晚期随着广泛的海侵，聚煤作用迁移到滇东、黔西一带，晚二叠世主要形成了贵州境内的龙潭煤系。

晚三叠世在我国南方以四川、云南、江西和湖南一带形成重要的含煤地层，分别以须家河组和安源组为代表；北方以陕西延长组为代表，仅含有薄煤层。

侏罗纪时期由于“燕山运动”遍及全国，此时期形成的煤田最多，主要集中于华北及西北地区。著名的煤田主要有神府、东胜煤田，大同煤田及新疆地区的尚未开发的煤田。侏罗纪煤田储量最丰，其中早、中侏罗世聚煤作用由西北向华北地区扩展，以新疆水西沟群和山西大同群为代表，在新疆、陕北等地常形成巨厚煤层，是我国最强盛的聚煤期；晚侏罗—早白垩世随着潮湿气候带的北移，聚煤盆地集中分布于东北和内蒙古东部地区，形成巨厚煤层。

新生代早、晚第三纪在我国均有重要含煤地层形成。早第三纪含煤地层主要发育于北方，抚顺煤盆地始新世—渐新世含煤地层，如山西繁峙组、华北平原沙河街组和东海盆地花港组，含煤性较差。早第三纪华南大部分为红层沉积，仅沿海和云南西部一带有煤盆地零星分布，如广西百色、广东茂名等煤盆地；晚第三纪中新世含煤地层主要分布于云南及台湾省，以云南小龙潭组为代表，含有巨厚煤层。上新世聚煤作用集中于西南地区，以滇东北的昭通组为典型，亦有巨厚煤层发育。晚第三纪的聚煤作用可延续至第四纪，云南昆明盆地含有褐煤沉积岩主要为更新世堆积。

6. 煤层气的成因

被掩埋的植物体经过微生物的生物化学作用转化为泥炭（泥炭化作用阶段），泥炭又在地质作用下发生物理化学反应向褐煤、烟煤和无烟煤转化（煤化作用阶段）。在煤化作用过程中，成煤物质发生了复杂的物理化学反应，挥发分和含水量减少，发热量和固碳量增加，同时生成了以甲烷为主的气体。泥炭在煤化作用过程中，通过两个过程，即生物成因和热成因过程而生成气体，生成的气体分别称为生物成因气和热成因气。

煤储层有机质性质和煤化程度决定着煤化作用过程中产气量的大小。煤化程度高，产生的煤层气就多。根据有关专家估计，煤体由褐煤转化为烟煤的过程，每吨煤伴随330立方左右的甲烷及130立方左右的二氧化碳析出。据苏联专家预测，形成1吨褐煤可产生38~68立方米煤层气；长焰煤可产生138~168立方米煤层气；气煤可产生182~212立方米煤层气；肥煤可产生199~230立方米煤层气；焦煤可产生240~270立方米煤层气；瘦煤可产生257~287立方米煤层气；贫煤可产生295~330立方米煤层气；无烟煤可产生346~422立方米煤层气。

（1）生物成因气。生物成因气是指在相对低的温度（一般小于50℃）条件下，通过细菌的参与或作用，在煤层中生成的以甲烷为主并且含少量其他成分的气体。在这个过程中微生物起到了决定作用，直接影响成气和成气量，所以成气环境要有利于微生物

成长。一般要求大量有机物的快速沉积、充裕的孔隙空间、低温和高 pH 的缺氧环境。生物成因气的生成机制有两种，即二氧化碳的还原作用（二氧化碳还原形成甲烷）和有机酸（一般为乙酸）的发酵作用（乙酸、甲醇、甲胺等发酵形成甲烷）。尽管两种作用都在近地表环境进行，但根据组分研究，大部分古代聚集的生物气可能来自二氧化碳的还原作用。根据生气时间和母质及地质条件的不同，生物成因气有原生生物成因气和次生生物成因气两种类型，在早期生成原生生物成因气，在晚期形成次生生物成因气，两者在成因上无本质差别。原因是泥炭在细菌的分解下可生成大量的生物成因甲烷，但由于泥炭化阶段，盖层条件主要为裸露的地表水，气体很容易扩散到大气层中，因此在这一阶段所生成的甲烷等气体绝大部分无法保存。进入褐煤阶段仍然生成生物成因的甲烷，由于褐煤镜煤反射率 $R_0 < 0.50\%$ ，也就是说已经有了盖层，并形成一定的温度（约 50°C ），在漫长的地史中，可生成一定数量的生物成因甲烷和少量热成因甲烷。

①原生生物成因气。原生生物成因气形成于泥炭沼泽环境中，煤的变质程度较低，镜质组反射率小于 0.5，处于泥炭褐煤阶段，埋深较浅，在这种环境下由于温度较低，有机物结构不能发生变化而形成气体。该阶段的甲烷是微生物对有机物的分解而形成的，即原生生物成因煤层气的生成遵从厌氧发酵理论。在泥炭沼泽环境中，随着上浮有机物不断沉积，达到一定厚度时，沉积环境变为还原性，而有机物上部仍为氧化性。虽然甲烷生成于还原环境，但氧化环境为成气提供了物质基础。在氧化环境中纤维素、蛋白质等有机物在煤的作用下可以形成单糖，单糖是形成甲烷的物质基础。具体来说，生物甲烷的产生最终由产甲烷菌通过二氧化碳还原和乙酸发酵作用形成，即：



沉积环境在经历最初的耗氧及兼性细菌的作用后转变为厌氧环境，厌氧细菌和兼性厌氧细菌在此环境中将泥炭或低煤级煤分解，最终通过产甲烷菌的作用形成甲烷，即原生生物成因煤层气。但一般认为，原生生物成因煤层气不能被大量保存在煤层中。这是因为，早期煤岩发育不成熟，水分占据大部分煤岩孔隙，煤岩不能大量吸附煤层气而使其溶解在煤层水中，但这部分煤层气容易在后来的煤化作用和地质作用中散失掉。

我国抚顺盆地的煤现在煤级为长焰煤和气煤，由于煤层厚度平均为 50 米，而且顶板直接为一巨厚层油页岩层，这就有可能使在泥炭—褐煤阶段生成的甲烷部分残存在煤层中，其煤层气含量为 $5.55 \sim 15.23$ 立方米/吨，平均为 9.23 立方米/吨，比同煤级的气含量高。而推测煤层中可能保留了褐煤级期前生成的原生生物气。

美国的粉河盆地，煤层单层厚达 67 米，总厚 118 米，镜质组反射率 $R_{\text{max}} = 0.3\% \sim 0.4\%$ ，煤层甲烷含量仅为 $0.03 \sim 2.3$ 立方米/克，是美国煤层甲烷达到商业开采中最低

的煤级,这说明褐煤中煤层甲烷由于煤层厚度大,也是可以被富集成工业气田的(Pratt, etal, 1991)。由泥炭—褐煤主要是在细菌分解和发酵减少二氧化碳,生成甲烷。

目前发现的生物煤层气藏多为次生生物成因。

②次生生物成因气。次生生物成因气是指煤系在后期被构造作用抬升并剥蚀到近地表,细菌通过流动水(多为大气降水)运移到煤层水中,在低、中煤级($R_0 < 1.5\%$)煤中当温度、盐度等环境条件又适宜微生物生存时,在相对低的温度下(一般小于 56°C),细菌通过降解和代谢作用将煤层中已生成的湿气、正烷烃和其他有机化合物转变成甲烷和二氧化碳,这种在微生物作用下形成的煤层气称为次生生物成因气。次生生物成因气与原生生物成因气成气条件有很大差异,一般要求煤的变质程度处于褐煤、焦煤阶段,煤系地层发生过抬升或隆起作用,煤层渗透效果好,有细菌运移到煤层中。

(2)热成因气。热成因气是当温度超过 50°C ,煤化作用增强,煤中碳含量丰富起来,而大量富氢和富氧的挥发分释放出来(即去挥发分作用),其主要成分是甲烷、二氧化碳和水等。在较高温度下,有机酸的脱羧基作用也可以生成甲烷和二氧化碳。

随着煤层埋深不断增加,温度上升,煤的变质程度不断增加,煤中有机质不断脱碳、脱氢、富碳而生成了大量的甲烷和其他气体,如二氧化碳。生成气体的类型和生成气体量取决于煤阶,即煤的热演化程度。随着煤变质程度不断增加,成气作用大致可以分为三个阶段。

第一阶段为低变质阶段,即“褐煤—长焰煤”阶段。该阶段温度为 60°C 左右,生气量大。煤层气形成于物理化学/生物作用,生气量主要以二氧化碳为主,约占80%,而烃类气体总量小于20%,且以甲烷为主,重烃含量较少,不到4%。从化学变化的角度,该阶段主要发生脱水、脱羟基,反应前期主要生成水,后期二氧化碳和甲烷产量明显增加。从地质储存角度,该阶段形成的气体大多逸散。

第二阶段为中等变质阶段,即“长焰煤—焦煤”阶段。该阶段温度为 135°C 左右,煤层气形成于热裂解作用,生气量主要以烃类气体为主,可达70%~80%,二氧化碳下降至10%左右。其中,烃类以甲烷为主,重烃浓度明显增高。在生气高峰阶段生成重烃含量较高的湿气,“气煤—肥煤—焦煤—瘦煤”阶段所生气体以湿气为主,在我国只有局部地区是湿气。从化学变化的角度,由于有机物中各种官能团活化能大小不同,在热力作用下发生相应的分馏效应。该阶段可以分为三期:早期,以含氧官能团的断裂为主,产生二氧化碳,芳香烃结构上烷烃支链部分断裂,形成少量甲烷和乙烷以上的重烃;中期,树脂等稳定组分有机物初步降解为沥青,芳香烃核结构烷烃支链断裂,形成含重烃的气体;晚期,沥青等大分子烃类裂解,形成含甲烷的气体。

第三阶段为高变阶段,即“瘦煤—无烟煤”阶段。该阶段温度超过 165°C ,煤层气主要形成于热裂解作用,以烃类气体为主,可达到70%左右。其中,绝大多数为甲烷,占97%~99%,重烃浓度显著降低。该阶段所生气体绝大多情况下是干气,生气方式也

发生了改变,不再以烷烃支链断裂生气为主,而是以芳香烃核之间的缩合生气为主。

(3) 煤层气的组分与同位素组成特征。Rice 总结了世界各地煤层气的组分和同位素组成资料。从 Rice 的研究成果可以看出,世界各地煤层气的组分和同位素组成差异很大。气体中烃的组成用气体湿度(C_{2+} ,即乙烷及其以上重烃百分含量)来表示,湿度介于0~70.5%。煤层气的同位素组成有较大差异,甲烷的 $\delta^{13}C$ 值分布范围很宽,在-8%~-1.68%之间;乙烷的 $\delta^{13}C$ 值为-3.29%~-2.28%;甲烷的 δD 值为-33.3%~-11.7%;二氧化碳的 $\delta^{13}C$ 值为-2.66%~+1.6%。从煤样中解吸出的甲烷的 $\delta^{13}C$ 值比开采气或自由(游离)气体中甲烷的 $\delta^{13}C$ 值高出几个千分点。这是因为在解吸作用过程中,发生同位素分馏作用, $\delta^{13}C$ 富集到了解吸气体中。

此外,在同一盆地中,变质程度相同的煤,其煤层气的组分和同位素组成也有变化。

总之,煤层气是经过漫长的演化过程形成的。其组分和同位素组成受各种复杂因素的影响而不断发生变化,从而造成世界各地煤层气的组分和同位素组成的千差万别。

1.3 煤层气的保存条件

煤层气的保存条件主要是指盖层的封盖能力、水动力条件和构造运动等因素。在地质历史中,上述地质作用主要通过改变地层的温压条件而改变吸附与解吸和吸附与溶解之间的平衡,控制地层中的煤层气赋存形式,从而影响煤层气的保存。

煤层气藏与常规天然气藏不同:煤既是气源岩,又是储集岩。一般来讲,煤的生气量主要是由于煤岩自身的吸附能力和保存条件的不同造成的,从长焰煤开始,累积生气量都在50立方米/吨以上,Decker(1987)认为煤的生气量比其保存的气量要高8~10倍,也就是说煤的生气量远远超过现今各煤层的实际含气量(一般5~20立方米/吨)。

1. 较强的吸附能力是煤层气富集的前提

煤层气以溶解气、游离气和吸附气三种方式赋存于煤层的双孔隙系统中,即割理系统和微孔隙系统。割理孔隙度一般都是较小且被水充满,溶解气、游离气较少,煤层气主要以吸附状态赋存于煤的基质微孔中,吸附气占总含气量的90%~95%以上,正是由于煤的这种吸附特性决定了煤的储集能力。

在地层条件下,吸附气、游离气和溶解气处于一种动态平衡过程中,在达到吸附平衡后,吸附量是压力和温度的函数。但煤对气体的吸附属于物理吸附,吸附与解吸是可逆的,当温度和压力条件改变后,吸附量也会改变:当压力下降或温度升高时,吸附气就会解吸,转化为游离气。同样,在地层水交替作用下,原有的平衡条件也会被打破而

使吸附气越来越少。由于吸附气的活性较游离气和溶解气弱得多,更易保存,因此煤的吸附能力越强,吸附量越大,越有利于煤层气的保存。

各种地质作用就是通过改变吸附与解吸及吸附与溶解的关系而影响煤层气的保存。

2. 良好的封盖条件是煤层气保存的重要因素

封盖层对于煤层气的保存与富集具有十分重要的作用。煤层气属于自生自储式,不需要初次运移,良好的封盖层可以减少煤层气的向外渗流运移和扩散散失,保持较高地层压力,维持最大的吸附量,减弱地层水中对煤层气造成的散失。封盖层对于煤层气藏的作用主要是维持吸附与解吸的平衡,减少游离气的逸散和减弱交替地层水的影响。

封盖层的质量越好,封盖能力越强,煤层气只能以扩散方式运移,逸散很慢;封盖层的质量较差,缺乏毛细封闭能力,气体则以渗流方式运移,逸散速度较快。在不同沉积环境下形成的不同类型封盖具有不同的封盖能力,泥页岩、盐岩、膏岩及致密碳酸盐岩等透气性差,且性能稳定,就可以形成良好的封盖层,有效地阻止煤层气的垂向运移,有利于煤层气的保存。地区不同,地质作用的影响程度不同,同类型封盖层的封盖性能也不完全相同。因此,封盖能力应根据具体地区的地质条件有差别对待,因地制宜。

煤层气通过封盖层逸散主要有两种方式:一种是渗流运移,另一种是扩散运移。究竟以哪种方式运移主要由上覆岩层的封盖性能控制。

(1) 上覆岩层如果是超致密层,即良好的封盖层,其排替压力大于煤层中流体的剩余压力,具有良好的毛细封闭能力,则气体只以扩散方式运移,其运移速度是相当缓慢的,煤层气逸散量可用岩石的扩散系数等参数估算。

(2) 当煤层中的剩余压力大于上覆封盖层的排替压力时,气体则以渗流的方式运移,气体逸散速度与气体的有效渗透率及剩余压差有关,剩余压差越大或气体的有效渗透率越高,逸散越快,此时主要是游离气体逸散,当煤中压力小于盖层的排替压力时,逸散即告结束,如果气源充足,此过程则重复进行,如超压很高则有可能产生微裂缝而使气体呈间歇式散失;如果煤层中没有游离气,而是由于静水压力引起的超压,则只有扩散运移,也就是说在没有压降时,吸附气难以解吸而进行逸散。

(3) 如果上覆岩层是渗透层,如砂岩或裂隙性泥页岩等,因其排替压力很小,扩散运移快,气体则会向砂岩中运移,再加上水动力的影响,煤中吸附气也会从基质中解吸出来转移到渗透层中。

(4) 如果上覆岩层是具有生气能力强的烃源岩,则会阻止煤层甲烷向上逸散,甚至会向煤层中输入天然气。

3. 地层水弱交替区或交替水阻滞区有利于煤层气的保存

除了需要良好的封盖层之外,煤层气藏的形成还需要有一个较稳定的水动力条