

倪小明 苏现波 张小东 著

COAL BED METHANE DEVELOPMENT GEOLOGY

煤层气开发地质学

ДЕЛЕГОРШЕНІ ГЕОЛОГІА
СОВ'ЯСЬКІЙ МЕДИЦИ

10.2



化学工业出版社

倪小明 苏现波 张小东 著

52

COAL BED METHANE DEVELOPMENT GEOLOGY

煤层气开发地质学

P618.110.2
N517

P618.110.2
N517



化学工业出版社

北京

本书以沁水盆地煤层气开发区资料为基础,结合作者近期的研究成果,对煤层气开发地质学的基本理论和研究方法进行了系统论述,从而基本界定了煤层气开发地质学的基本内容。全书共分八章,包括煤层气系统、煤储层的原始渗透率、煤层气开发井型选择及井网布置、水力压裂基本原理及压裂后煤储层的渗透率、煤层气井的产气机理及产能的主控因素、煤层气井排采过程的物性参数变化、煤层气井的排采控制和煤层气开发过程的动态监测及生产管理。

本书可供从事煤层气地质及勘探开发领域的高年级本科生、研究生及科研院所的科技人员、工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层气开发地质学/倪小明,苏现波,张小东著. —北京:化学工业出版社,2009.12
ISBN 978-7-122-07054-8

I. 煤… II. ①倪…②苏…③张… III. 煤层-地下
气化煤气-采矿地质学 IV. P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 203994 号

责任编辑: 窦 臻
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 张 辉

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 16 1/4 字数 315 千字 2010 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: 39.00 元

版权所有 违者必究

序

煤层气巨大的资源潜力，以及作为一种新型优质高效洁净能源，从煤矿安全和环保的角度考虑，我国政府部门对煤层气勘探开发给予了高度重视。1989年原能源部召开“第一次全国煤层气研讨会”，拉开了我国煤层气勘探开发的序幕。

二十余年来，我国煤炭部门、石油部门、地矿部门、地方政府、国内外煤层气公司等先后在中国42个含煤区施工了3000余口煤层气井。但是，除了山西沁水盆地东南部、辽宁铁法、山西河东煤田等少数地区实现了局部商业化开发外，大多数煤层气井开发试验结果不理想。究其原因，除客观地质因素影响外，最主要的是煤层气开发是一项系统工程，地质是煤层气开发的基础，开发工艺是地质过程的工程延伸，而要获得工业性气流，需要地质条件与开发工艺技术的有机匹配；需要考虑钻井工程、射孔、压裂工艺对产能的附加影响；需要排采工作制度与地质条件的有机结合。长期以来，基础地质理论与勘探开发工艺技术研究一直分属两种不同性质的工作，两者不能有机结合是造成目前我国煤层气在煤储层这个“母体”孕育后不能健康成长的重要原因。行之有效的开发理论相对匮乏，主观失误频繁发生，这些都可能导致煤层气开发试验的失败，甚至“夭折”。

《煤层气开发地质学》正是基于我国目前煤层气开发的现状，把地质理论与工程实践有机结合的首部学术专著。作者应用系统论的观点，以室内试验和现场生产数据为基础，以当代流体力学、渗流力学、油气藏工程、地质工程等学科理论为指导，数据分析与专题研究密切配合，注重基础资料的深刻挖掘，以影响煤层气开发的重要评价参数——渗透率为主线，定性分析与定量评价相结合，在煤原始储层渗透率、水力压裂工艺、水力压裂后渗透率、排采过程中各种物性参数变化、不同排采阶段排采过程的排采控制等方面取得了新的认识，尤其是在原始储层渗透率预测方法、水力压裂后渗透率预测方法、“虚拟储层”压裂理论、排采控制等理论方面取得了诸多创新性成果。

该书以我国地质条件为基础，与目前的开发工艺技术紧密结合，得出具有工程实践指导意义的理论模型。内容丰富，数据翔实，深信这本书的出版对我国煤层气的勘探开发和深入研究将起到积极的推动作用，对从事煤层气地质及勘探开发的科技工作者及现场工作人员具有很高的参考价值。

中国工程院院士

2009年9月

前 言

随着国民经济的快速增长，国内能源供需矛盾日益加剧。贫油、贫气的现实，使我国石油、液化天然气的进口量逐渐增加，对国际能源市场的严重依赖，严重威胁到了国家能源安全；煤炭开采难度、开采深度的加大，部分老矿区面临资源枯竭问题；能源结构中煤炭所占份额达 2/3，洁净能源所占比例远远低于世界平均水平……所有这一切问题都要求我国尽快开发其他洁净能源。我国煤层气资源十分丰富，埋深 2000m 以浅煤层气地质资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，与我国陆上天然气资源量相当。因此，开发利用丰富的煤层气资源，从某种程度上可有效增加洁净能源供给，改变目前不合理的能源结构。

美国自 20 世纪 80 年代开始，进行了系统的煤层气地质基础研究，形成了“煤储层双孔隙几何模型”、“中阶煤生储优势与成藏优势理论”、“生物型或次生煤层气成藏理论”、“中阶煤选区评价理论”、“低渗极限与高煤阶煤层气缺陷理论”、“煤储层数值模拟技术”等为核心的煤层气勘探开发理论体系，在此基础理论支撑下，形成了“地面钻井—完井—试井—压裂—排采”为核心的技术工艺流程，使美国的煤层气年产量突破 $500 \times 10^{12} \text{m}^3$ （2005 年）。我国在引进、消化、吸收美国成功经验基础上，逐渐形成了“欠平衡钻井技术”、“水力加砂压裂技术”、“煤层气多分支定向长钻孔技术”，率先在沁水盆地的高阶煤中获得了商业化开发，推翻了美国“高阶煤煤层气缺陷理论”，充分说明理论的进步是工程技术实施的基础。

煤层是煤层气的载体，成煤环境的多期性和多样性决定了煤层气富集的复杂性；煤层气是不可再生的，是流体，是“活的”。煤层气的这些特点及目前国内煤层气的开发迫切要求从事煤层气工作的科技人员，不仅要研究煤层气的静态特征，而且要研究煤层气开发过程中的动态特征；不仅要研究煤储层的宏观特征，而且要研究煤储层的微观特征及与之匹配的开发工艺的选型；不仅要研究煤储层对产能的影响，而且要研究不同开发工艺引起煤储层特征的变化进而对煤层气井产能的影响，即从我国自身的地质条件出发，研究出一套与我国煤层气开发工程相匹配的，对现场具有一定指导意义的煤层气地质开发理论，使煤层气开发地质从以前的定性分析、盲目性逐渐向半定量化、定量化、针对性发展。

煤层气开发地质学作为煤层气地质学的一个重要分支，它包括从煤层气投入开发至开发结束全过程的地质研究工作，且在不同开发阶段赋予了不同的研究内容。煤层气开发意味着地下流场的变化，涉及煤岩学、煤田地质学、煤层气地质学、渗

流力学、岩体力学等多学科的交叉与渗透；作为一门新兴学科，开发是归结点，地质是工程开发的基础，中国地质条件的复杂性决定了开发工艺的多样性，开发工艺的多样性决定了开发理论的适用性。基于不同的地质条件，结合不同的开发工艺，探讨开发理论的适用条件是指导中国煤层气开发的当务之急。为此，笔者根据以往大量的资料和近些年来的科研成果，撰写了《煤层气开发地质学》一书，以期对我国煤层气开发提供理论指导，推动我国煤层气产业的发展。

本书在撰写过程中，尽可能利用最新的生产和科研资料，以及笔者近期的科研成果，使其内涵尽可能广泛。笔者立足于我国煤层气开发的地质条件，以影响煤层气产出的重要评价参数——渗透率为主线，对煤储层原始渗透率、水力压裂改造后渗透率、排采过程中渗透率的变化及排采时不同阶段、不同过程渗透率的控制等方面进行了理论分析。本书在理论分析的同时，在目前煤层气地面开发最成功的沁水盆地东南部进行了实践求证，初步建立了煤层气开发地质学理论体系。

本书撰写工作的分工如下：第一章、第二章、第八章，苏现波；第三章、第四章、第五章、第六章、第七章，倪小明；张小东参与了部分章节的撰写。全书由苏现波统一审核、定稿。

中国工程院彭苏萍院士欣然为本书作序；研究工作得到了中国矿业大学（北京）王延斌教授，北京奥瑞安能源技术开发有限公司杨陆武总裁，北京九尊能源技术开发有限公司李玉魁教授级高工，中联煤层气有限责任公司吴建光教授级高工的指导和帮助；河南理工大学张战营教授、李化敏教授对本书的编写提出了许多宝贵意见；硕士研究生李金海、魏庆喜、李广生、陈鹏等参与了资料收集、图件清绘工作，在此一并致以衷心谢意！笔者引用了大量国内外参考文献，借此机会对这些文献的作者表示感谢。

本书由长江学者和创新团队发展计划基金（编号：IRT0618）和国家自然科学基金项目（编号：40902044）共同资助。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝批评指正！

著者

2009年9月

目 录

第一章 煤层气系统

第一节 含油气系统简介	1
一、含油气系统研究历史	1
二、含油气系统研究内容与方法	3
三、含油气系统分类	3
第二节 煤层气系统	4
一、煤层气系统的概念	4
二、煤层气系统基本内容	5
第三节 沁水盆地煤层气系统	9
一、区域地质背景	10
二、煤层气的成因	13
三、煤层气含量与封闭	19
四、水动力学特征	21
五、煤层气储层特征	22
六、区域对比	25

第二章 煤储层的原始渗透率

第一节 煤体结构与渗透率的关系	27
一、煤体结构	27
二、煤体结构与渗透率的关系	30
第二节 渗透率预测方法	31
一、Hoek-Brown 破裂准则	31
二、煤岩体强度因子的建立	33
三、煤岩体分形维数	35
第三节 沁水盆地东南部煤体变形特征	36
一、煤体变形特征	36
二、煤体变形空间展布	38
三、强度因子与分形维数	39
四、强度因子、分形维数与构造的关系	39

五、强度因子、分形维数与煤体变形的关系	40
六、断层对煤体变形的影响	41
七、煤体变形与高渗区的展布	44
第四节 地应力对渗透率的影响	44
一、地应力参数的获取	45
二、沁水盆地东南部现今地应力状态	46
三、地应力与煤层气井产量关系分析	48
四、沁水盆地东南部高渗高产区预测	50

第三章 煤层气开发井型选择及井网布置

第一节 煤层气开发井型概况	52
一、中国煤层气钻完井工艺发展历程	52
二、垂直压裂井井身结构	54
三、多分支水平井井身结构	55
第二节 煤层气井型选择	56
一、两种煤层气井的异同	56
二、井型选择的影响因素	57
三、煤层气井型选择评判体系	58
四、煤层气开发井型选择	60
第三节 煤层气开发井网布置	60
一、井网布置的一般流程	61
二、垂直压裂井井网优化	61
三、多分支水平井井网优化	72
第四节 沁水盆地东南部井型选择及井网布置	79
一、沁水盆地东南部井型选择	79
二、沁水盆地东南部井网布置	81

第四章 水力压裂基本原理及压裂后煤储层的渗透率

第一节 煤层气垂直井的水力压裂机理	88
一、煤层气垂直井水力压裂的目的	88
二、煤层气垂直井水力压裂的原理	89
三、水力压裂的主要设备及施工工序	89
四、水力压裂效果的影响因素	93
五、水力压裂施工工艺参数优化	95
第二节 煤层气垂直井水力压裂裂缝形态的主控因素	105
一、地应力对裂缝形态的影响	105

二、上下围岩与煤层组合关系对裂缝形态的影响	105
三、煤岩性质对裂缝形态的影响	106
四、压裂施工作业对裂缝形态的影响	106
五、不同煤体结构水力压裂后主裂缝方位	107
第三节 煤层气垂直井水力压裂后煤储层的渗透率	112
一、压裂后煤储层渗透率的预测模型建立思路	112
二、水力压裂测量地应力原理及计算方法	112
三、水力压裂后渗透率预测模型	113
第四节 沁水盆地东南部水力压裂后渗透率预测	115
一、沁水盆地东南部地区地应力计算	115
二、沁水盆地东南部地区水力压裂后渗透率预测	116

第五章 煤层气井的产气机理及产能的主控因素

第一节 煤层气运移产出机理	119
一、煤储层孔隙结构模型	119
二、煤层气赋存状态	120
三、煤储层吸附性能的主要影响因素	122
四、煤层气产出的先决条件及控制因素	124
五、煤层气产出机理	125
第二节 煤层气垂直井产能主控因素	131
一、储层、资源状况、地质、构造对煤层气垂直井产能的影响	131
二、钻完井、压裂工艺对煤层气垂直井产能的附加影响	135
三、排采工作制度对煤层气垂直井产能的影响	145
第三节 多分支水平井产气产能的主控因素	148
一、产气机理	148
二、储层、资源状况、地质、构造对多分支水平井产能的影响	150
三、钻完井、井身结构关键参数对多分支水平井产能的影响	151
四、排采工作制度对多分支井产能的影响	156

第六章 煤层气井排采过程的物性参数变化

第一节 煤层气垂直井压降动态变化模型	157
一、煤储层孔-裂隙体系及模型	157
二、煤层气垂直井排采过程压力传递的影响因素	158
三、不同渗透率条件下的压力传递变化规律	160
四、煤层气垂直井排采阶段重新划分	165
五、煤层气垂直井压降动态变化模型	168

第二节 不同排采阶段垂直井物性参数变化模型	171
一、煤层气井排采过程煤储层渗透率的主要影响因素	171
二、饱和水单相流阶段物性参数变化模型	172
三、气水两相流压力平稳传递阶段物性参数变化模型	175
四、两相流压力仅在某些方向传递阶段物性参数变化模型	180
第三节 煤层气垂直井排采不同阶段各物性参数变化的内在机理	183
一、饱和水单相流阶段各物性参数变化的内在机理	183
二、两相流压力平稳传递阶段各物性参数变化的内在机理	183
三、压力仅在某些方向传递阶段各物性参数变化的内在机理	183
第四节 多分支水平井排采过程压降动态变化模型	184

第七章 煤层气井的排采控制

第一节 煤层气垂直井不同排采阶段井底流压的计算	185
一、饱和水单相流态井底压力计算模型	185
二、气水两相流态井底压力计算模型	185
第二节 煤层气垂直井不同排采阶段产水量动态预测模型	186
一、无越流补给不同排采阶段产水量动态预测	187
二、有越流补给不同排采阶段产水量动态预测	189
第三节 煤层气垂直井排采控制理论及排采曲线	191
一、各排采阶段的划分标识	191
二、各排采阶段的排采强度模型及产水量、产气量变化	193
三、煤储层渗透率与垂直井排采曲线关系	217
第四节 沁水盆地东南部煤层气垂直井排采控制	217
一、理论解吸压力与实测解吸压力对比	218
二、不同排采阶段过渡处产水量预测结果与实际结果对比	219
三、储层改造前后不同情况下典型实测产气量曲线对比	220
四、不同排采阶段排采控制预测结果与实际结果对比	222
第五节 多分支水平井排采控制	224

第八章 煤层气开发过程的动态监测及生产管理

一、煤层气有利选区评价阶段	227
二、小型井网试采阶段	227
三、滚动开发并调整管理阶段	227
第一节 煤层气井资料的录取	228
一、排液数据的录取	228
二、产气数据的录取	232

第二节 煤层气井动态监测	232
一、煤层气井自动监控系统总体结构	232
二、煤层气井自动监控系统各部分主要功能	233
第三节 煤层气生产井的管理	238
一、排采作业生产管理	238
二、排采设备管理	240
参考文献	243

第一章 煤层气系统

煤层气系统是含油气系统在煤层气领域的应用与发展,是建立在含油气系统理论和研究方法基础上的,是煤层气富集规律探讨的一种理论途径。因此,本章首先阐述含油气系统及其研究历史与现状,然后界定煤层气系统的基本概念、研究方法和内容。严格意义上,煤层气开发地质学应包括煤层气高丰度富集的内容,但这一部分已经在其他众多煤层气领域的著作中涉及,本书将从煤层气系统角度对煤层气的富集进行探讨。

第一节 含油气系统简介

一、含油气系统研究历史

含油气系统 (petroleum system) 是石油地质学理论发展的阶段性产物,它是介于盆地和油气聚集区带之间的一个研究范畴。一个盆地可以包括一个或几个含油气系统,一个含油气系统可以包括若干个油气区带,一个油气区带可包括若干个油气藏。尽管现在的应用范围拓展到油气资源评价和地质研究领域,但其研究的主要目的和任务是提高油气勘探精度、降低勘探风险,也就是说含油气系统研究主要为油气勘探服务。

含油气系统的概念首先是国外提出的,其经历了以下几个演化阶段:石油系统^[1]、含油气系统^[2~5]、产油盆地^[6]、石油生成器^[7,8]、独立含油系统^[9]、含油气系统^[10~12]。

1972年, Dow 在美国丹佛举行的 AAPG 年会上提出了石油系统 (oil system) 的概念,于 1974 正式面世。它是建立在油-油对比和油-源对比的基础之上的。

Perrodon^[13]和 Masse^[6]首先提出了含油气系统 (petroleum system) 的概念。认为“含油气系统是由具有相似天然要素组成的、具有相似功能的构造地质体”,它反映出形成了一系列相关油气,或是一个含油气系统。Perrodon 的含油气系统强调地层的沉降运动和伴生流体的重要性。

Demaison 首先提出了产油盆地 (generative basin) 的概念。认为“产油盆地是具有一个或多个产油坳陷的沉积盆地”^[6]。“产油坳陷”又称“油气灶”,是指“有效烃源岩覆盖的地区”。它的圈定依据是成熟度、有机地球化学资料和通过地

震、深钻井获得的构造和沉积资料。

Meissner 提出了石油生成器 (hydrocarbon machine) (或烃生成器) 的概念。认为石油生成器包括“烃源岩中油气生成、运移、聚集过程中所有基本要素的层系”^[7,8]。基本要素主要是烃源岩、储集层、盖层和圈闭。

Ulmishek 将独立含油系统 (independent petroliferous system) 定义为“一个独立的以区域性隔挡与围岩隔离的岩体, 其内发生了包括油气在内的流体运移”^[9]。它包括烃源岩、储集层、区域性盖层和圈闭。该概念最先用于描述“石油资源评价”的地层学特征。

1988 年, Magoon 将含油气系统定义如下: “一个油气系统包括自然界油气聚集存在所必需的所有地质要素和作用”, “基本要素包括一套烃源岩、运移途径、储集岩和圈闭”, “地质作用为形成所有这些基本要素的作用”^[11]。含油气系统为“油气生成和聚集的物理-化学动态系统, 它在地质空间和时间范围内起作用, 包括形成油气藏所必需的一切地质要素(烃源岩成熟、排烃、二次运移、聚集、保存) 及形成这些地质要素的地质事件, 并要求这些要素在时间上匹配”。

Magoon 和 Dow 将含油气系统界定为: 含油气系统为这样一个天然系统, 它包括成熟烃源岩及与此相关的所有石油和天然气, 还包括油气聚集存在所必需的所有地质要素和成藏作用^[12]。其中“成熟烃源岩”目前可能不再是有效烃源岩, “油气”则包括: ①在常规油气储集层、天然气水合物、致密储集层、裂缝性页岩和煤层中发现的热成因气或生物成因气; ②在自然界发现的凝析油、源油和沥青。“系统”则指构成存在油气聚集地质单元的相互关联的所有基本要素和成藏作用, 其中基本要素包括烃源岩、储集层、盖层和上覆岩层, 成藏作用包括圈闭的形成和油气的生成、运移、聚集。Magoon 和 Dow 的含油气系统是对前人工作的总结, 它的提出标志着含油气系统概念的成熟, 而《含油气系统-从烃源岩到圈闭》的面世标志着含油气系统理论的成熟^[14~17]。

相比之下, 国内提出的“成油系统”概念与油气系统相对应。成油系统是指某一地质时期由统一的油气运移、聚集过程联系在一起的油源、储集层、盖层、圈闭四个成油要素所组成的整体^[18]。“每一个成油系统都有自己的特征和成油要素, 有相对的独立性, 并形成一或数个油气聚集带。”费琪则提出“成油体系”概念, 认为“petroleum system”突出了石油成矿过程中所需条件的时空配置关系, 因此, “译成‘成油体系’更为合适”^[19]。

事实上, 烃源岩与含油气系统并非一一对应关系, 常出现一源多藏、一藏多源。根据经典的含油气系统的定义, 一源多藏仍构成一个含油气系统, 而一藏多源则应划分出数个与烃源岩套数相同的含油气系统。为了更好地阐述上述复杂的现象, 提出了复式含油气系统 (multiple petroleum system) 概念, 即同一源区由于发育多套烃源岩而形成的与之对应的多个含油气系统。这里的同一源区可以是一个

凹陷，也可以是一个注陷。

二、含油气系统研究内容与方法

含油气系统的研究内容不同于沉积盆地和油气聚集带，它着重研究烃源岩与油气藏之间的成因联系。它的内容包括：①各种成因的天然气、凝析油、原油、重油及固态沥青；②烃源岩、储集岩、盖层和上覆岩层等基本要素；③圈闭的形成和油气的生成、运移、聚集等地质作用；④上述诸因素在时间和空间上的配置关系。

研究方法主要有系统结构图解法、系统成因分析法和系统模型类比法^[20]。

系统结构图解法由 Magoon 首创，即通常所说的“四图一表法”。

系统成因分析法由 Demaison 基于含油气系统中油气生、排、运、聚、散的动力学性质和过程提出。作者将含油气系统分为两个子系统，即受化学动力过程控制的生烃子系统和受物理动力学控制的运移-捕集子系统。

Perrodon 从油气生、储、盖组合的盆地整体出发，提出一个遵循整体相似性原则的复合型系统类比评价模型，由此，开创了系统模型类比法。在他所提出的模型中，最小功能单位是油气生、排、运、聚及其赖以发生的烃源层、排运通道、储集层和盖层。

三、含油气系统分类

出发点和角度不同，不同研究者对含油气系统采用了不同的分类。含油气系统主要存在以下几种分类。

Magoon 根据烃源岩成熟演化成烃的主控因素将含油气系统分为典型和非典型两种^[11]。所谓“典型”含油气系统是指上覆岩层变厚使烃源岩埋深增大，热成熟生烃的含油气系统；“非典型”含油气系统是指未成熟烃源岩因火成岩侵入、大洋中脊与裂谷深部热流或生物作用等影响而局部生、排烃的含油气系统。

Magoon 和 Dow 按可靠性级别将含油气系统分为已知的、假设的和推测的三种类型^[13]。所谓“已知的”含油气系统，其成熟烃源岩与油气聚集之间存在很好的地球化学可比性；“假设的”含油气系统，其烃源岩由地球化学资料确定，但该烃源岩与油气聚集之间尚未确定存在地球化学可比性；“推测的”含油气系统的烃源岩和油气的存在完全是根据地质和地球物理资料推测的。

Demaison 和 Huizinga 根据含油气系统油气充注程度分为超充注、正常充注和欠充注三类；根据油气排驱的样式，分为垂直排驱和侧向排驱两类；根据油气捕集样式，分为高阻抗捕集和低阻抗捕集两类^[18]。

1992 年 Perrodon 根据沉积盆地动力学背景，按含油气盆地的性质将油气系统划分为三种：大陆裂谷含油气系统、地台含油气系统和造山带含油气系统^[19]。

赵文智等综合考虑油气充注、储盖组合、运移样式、圈闭类型和保存条件等因素,将含油气系统划分为 108 种基本类型^[20]。同时,还根据含油气系统在空间和时间上的组合形式,将复杂性含油气系统划分为并列型、交叉型、叠置型、侧接型、同时型、连续型、间断型和分段型 8 种类型。

第二节 煤层气系统

一、煤层气系统的概念

Magoon 和 Dow 的含油气系统定义有煤层气系统概念的影子,因为“油气”包括了煤中的热成因气和生物成因气,亦即煤层气。但煤层气系统与常规含油气系统存在诸多差别,有必要给煤层气系统一个明确定义。然而,有关煤层气系统的研究并不多见,国内外仅见于吴世祥^[21]、刘焕杰^[22]、苏现波^[23]、Ayers^[24]的论述。

吴世祥将煤层气系统定义为“一个具有一定埋深的含煤体系(盆地或含煤区)”,它包括“形成煤层气富集的各种静态因素和动态因素”;“一定埋深”是指“瓦斯风化带以下至 2000m”,“静态因素”包括“煤层的空间分布、煤岩煤质及生气特征、煤储层含气量、煤层顶底板及封盖”,“动态因素”包括“构造发育史、埋藏史、热史、水动力场、古应力场”,将煤层气系统分为生成子系统和聚集子系统。

刘焕杰等提出类似于含油气系统的概念——含煤层气系统,包括“已形成的煤层气藏、源岩(煤层)、煤储层、盖层、上覆岩层和煤层气藏形成时的一切地质作用及其合理的时空配置”。认为“只有将含煤层气系统作为一个整体进行综合研究,才能客观查明煤层气的赋存规律、准确确定煤层气富集高产带”。

Ayers 指出煤层气系统在源岩、气体生成、运移通道以及赋存、圈闭机制等方面有别于常规含油气系统,未给出明确的煤层气系统的概念。

通过比较煤层气系统与常规含油气系统(表 1.1),同时借鉴前人的研究成果,本书将煤层气系统定义为:“一个包含一套有效烃源岩即煤层和它生成的煤层气,以及煤层气富集所必需的所有地质要素和地质作用过程的天然系统”。基本要素包括源岩(储集层)、保存条件(顶底板、断层、水动力条件、侧向封闭和上覆地层)。地质作用过程则包括煤层气生成、运移、聚集。煤层气系统边界按如下方法确定:横向上以同一烃源岩或者地质历史(埋藏史、热演化史、生烃史)类似、相近的不同烃源岩为界;纵向上以下覆封闭层为下界,上覆盖层为上界,它可以划分出次一级的地质单元煤层气藏。

表 1.1 含油气系统与煤层气系统比较

项目	含油气系统	煤层气系统
烃源岩	泥岩、页岩	煤级不同的煤
储集层	砂岩等碎屑岩、碳酸岩、火山岩	煤层；广义上还包括顶、底板砂岩
盖层	直接覆盖于烃源岩之上的地层	包括上覆盖层和下伏封闭层
圈闭	地层圈闭、构造圈闭、复合圈闭、水动力圈闭	圈闭包含水动力封闭因素
赋存	油气主要以游离态和溶解态存在；赋存空间为裂隙和孔隙	煤层气以吸附态为主，游离态和溶解态为次；赋存空间为基质孔隙、裂隙
运移	油气存在初次运移和二次运移，前者为从烃源岩到最近的储集层的运移，后者指进入储集层之后发生的运移	一般认为不发生运移，但新近研究发现存在运移，至少存在本煤层中运移，运移距离较常规油气要小
生、储、盖组合	存在正常式、侧变式、顶生式和自生自储式	通常认为自生自储
封闭	存在物性封闭、浓度封闭、断层封闭、水动力封闭等	以水动力封闭为主，较为常见，还存在物性封闭、浓度封闭、断层封闭等
持续时间	形成一个含油气系统所需要的时间	从煤层气开始生成至今
保存时间	指在油气生成、运移和聚集作用完成之后至现今的时间	从系统范围内各部位煤层气开始进入保存阶段的最早时间至现今
关键时刻	对应烃源岩埋深最大或所受温度最高，大量生烃	对成熟烃源岩，对应煤层埋深最大，大量生成热成因煤层气；对未成熟烃源岩，对应大量生成生物成因煤层气

二、煤层气系统基本内容

(一) 煤层气系统地质要素

煤层气系统地质要素可归纳为两个方面：烃源岩（储层）和保存条件。

1. 烃源岩（储层）

煤层既是煤层气的源岩又是储层，是煤层气系统的主体，直接决定了该系统是否具有商业开发价值。包含如下研究内容：煤层空间展布（煤厚、埋深、构造发育特征）、煤岩煤质特征、煤阶、吸附-解吸特性、储层压力、临界解吸压力、岩石力学性质、温度、孔隙度、渗透率、煤体结构、地应力、水质特征等。这一系列参数定量、定性评价了煤层气的载体——煤层的特征。

不同煤阶煤储层的性质差别较大，不仅涉及煤层气的成因，而且涉及煤层气的赋存、运移和产出。不同煤体结构煤储层的物性也有显著差异，涉及储层能否被改造，能否达到商业产能等。埋藏深度涉及地应力、温度等，同样也涉及开发的难易程度。因此，在进行煤层气系统研究时，煤储层特性系统描述是第一位的。

2. 保存条件

一个系统要有一个边界，涉及煤层气的保存，可区分为垂向和侧向两类边界。

(1) 垂向边界 煤层气系统的垂向边界取决于顶底板封闭能力、上覆地层有效厚度等。煤层气盖层对保持储层压力、阻止煤层气解吸和逃逸很必要，尽管不像常规气藏对盖层要求那么严格。与盖层起相同作用的储层底板称为封闭层。当储层压力降低，一部分吸附气会解吸成为游离气。当游离态煤层气的膨胀力和浮力大于盖层排替压力，将散失。而溶解态煤层气通过盖层散失方式主要是扩散，由高浓度（煤储层）向低浓度（盖层）方向进行。煤层气的富集与盖层的性质和埋深有关。适度埋深、具有一定厚度、岩性以泥质为主、封闭性较好的盖层有利于煤层气的保存。对于一个多煤层系统而言，如美国的粉河盆地，不仅煤层是储层，还发育常规的砂岩储层，可作为一个复合煤层气系统研究。系统的上下封闭边界可以以厚层的泥岩等作为封闭层。

上覆岩层包括自烃源岩顶面以上到第一个不整合面或沉积旋回界面之间的岩层段。一定厚度的上覆岩层的存在不仅促进煤层热演化，而且能减少煤层气的散失，有利于煤层气的保存。

(2) 侧向边界 煤层气封闭主要有物性封闭、岩性封闭、水动力封闭和断层封闭。

所谓物性封闭，即存在渗透性较差的煤层（Ⅲ类、Ⅳ类煤）或与煤储层相邻的致密岩体。

水动力封闭是形成侧向封闭和垂向封闭的重要途径，多数情形下没有水动力封闭，就不可能有煤层气的富集。侧向水动力封闭是指煤储层存在顶底板封闭，煤储层处于一个独立流体流动单元时，地下水沿煤层露头补给，向深部运移，不仅把浅部的煤层气携带到深部聚集，而且为煤层气的赋存提供了吸附所必需的压力。一般在地下水滞留区煤层气富集。另一类是煤层气顶板为砂岩等封闭性差的岩层，地下水沿顶板淋滤，形成静水压力促使煤层气保存。

断层封闭是被封烃类压力小于储层压力。被封烃类压力与相互连通的孔喉半径、烃液界面张力及润湿角有关；储层压力与储层内烃的密度、储层内烃柱高度有关。断层封闭性存在四种机理，即断层两侧岩性配置、泥岩涂抹作用、颗粒碎裂作用和成岩胶结作用，在相关书籍有详细阐述，在此不再赘述。

(二) 煤层气系统地质作用过程

1. 煤层气的生成

与天然气的成因相同，煤层气成因可分为两大类：有机成因和无机成因。且绝大多数情况下为有机成因。有机成因煤层气分为生物成因和热成因两类，见表 1.2。