

煤层气采气工程

杨宇 孙晗森 陈万钢 张凤东 张昊 著



科学出版社

煤层气采气工程

杨宇 孙晗森 陈万钢 张凤东 张昊 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于煤层气的地质和开发特征,针对煤层气开采问题,系统阐述了煤层气开采技术的原理,包括:煤层气的渗流规律、完井工艺、气井和气藏动态分析原理、排采机械、污水处理等方面的内容。在理论讲解的基础上,重点介绍了美国石油工程学会(SPE)在煤层气采气工程领域的新技术与发展。

本书适合从事煤层气开采的技术人员和管理人员参考阅读,也可作为高等院校相关专业教学材料。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气采气工程 / 杨宇等著. —北京: 科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-053740-9

I. ①煤… II. ①杨… III. ①煤层-地下气化煤气-采气 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 138083 号

责任编辑: 焦 健 韩 鹏 任加林 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 330 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

随着国民经济的发展，人们生活水平不断提高和大气环境治理日益迫切，对天然气的消耗量逐年加大。煤层气是一种重要的非常规天然气资源，是构建我国安全、绿色、高效的能源系统，维持经济可持续发展的最佳选择之一。

煤层气采气工程是衔接气藏工程和天然气集输工程的桥梁，煤层气藏排采管理与动态分析是煤层气采气工程的核心工作之一，贯穿于煤层气开发的始终。只有掌握煤层气开采动态变化规律，不断深入认识气藏开发特征，才能实现开采的最佳经济效益。目前国内的煤层气藏的开采，主要采用常规气藏的开采方法，很少有书籍专门针对煤层气开采的特殊性进行总结。《煤层气采气工程》一书根据美国石油工程学会（SPE）在北美和澳大利亚煤层气藏开采中的成功经验，系统阐述了煤层气开发的渗流规律、完井方法和生产动态分析方法，并且基于国内煤层气开采的现状，着重分析了煤粉防控机理，介绍了地层水排采方面的内容。

在该书的作者中，有从事煤层气藏开采研究的高校教师，也有长期从事煤层气藏开采的技术人员。该书以国内外大量的科研实践为基础，并参考了国内外煤层气藏的开采方法，注重基础理论和最新技术的结合，在编写过程中突出了科学、实用和可操作性的特点。该书既可供高等院校相关专业师生阅读，也可作为从事油气开发工作，特别是煤层气开发的专业技术人员的专业参考书。

该书的出版将为我国煤层气的开发起到积极的推动作用，为此在其出版之际以此序为贺！

中国工程院院士



2017年5月

前 言

煤层气主要吸附在煤基质颗粒表面、部分游离于煤层孔缝中或溶解于煤层水中，属非常规天然气。煤层气排采和常规油气开采相比存在较大差异。我国煤层气开发主要是借鉴美国和澳大利亚的成功经验，但在开发实践中发现中国煤储层条件和国外煤储层条件差别很大，美国和澳大利亚的很多经验在中国应用效果较差，需要对在现场行之有效的理论方法进行总结和提升。

本书编写过程中，主要参考了美国的油工程学会（SPE）在气藏工程领域近年来出版的书籍和论文，并且注意到了国内煤层气藏开采的现状，详细介绍了煤层气采气工艺，整体上分为9章。第1章由孙晗森和张昊编写；第6章由张凤东和杨宇编写；第7章由张凤东编写；第8章由陈万钢编写。其余章节由杨宇编写。陈红伟博士、田慧君、周伟、李波、张城玮、颜平和温勤参与了修改和校对工作。全书由孙晗森全面校稿。

本书在编写过程中，自始至终得到了成都理工大学能源学院的大力支持，以及油气藏地质及开发工程国家重点实验室周文教授、康毅力教授、闫长辉教授、阿德莱德大学石油学院 Bedrikovetsky 教授和 Haghghi 教授的指导，也得到了中联煤层气有限责任公司的支持，在此一并表示衷心的感谢。

本书编写的目的是将煤层气开采的基础理论系统地介绍给现场技术人员和相关院校的本科高年级学生，使读者较为系统地掌握相关理论知识，为开展此项工作打下较为牢靠的基础。

由于编写人员水平有限，本书难免存在缺点和不妥之处，敬请使用本书的师生和技术人员批评指正。

作 者

2017年5月

目 录

序

前言

第1章 煤层气藏表征	1
1.1 煤层气藏形成与资源分布	3
1.1.1 煤层气藏形成条件	3
1.1.2 煤层气资源分布	5
1.2 煤的微观结构特征	5
1.2.1 煤岩孔隙	5
1.2.2 煤岩裂隙	7
1.2.3 表征煤岩微观结构的低温静态容量法	10
1.3 地层压力与气藏温度	17
1.3.1 地层温度	17
1.3.2 地层压力	17
1.4 煤岩渗透率及其影响因素	18
1.4.1 Klinkenberg 效应	19
1.4.2 煤岩的应力敏感性	19
1.4.3 基质收缩效应	21
1.5 煤的相对渗透率曲线	23
第2章 煤层气藏流场分析	26
2.1 煤层气藏水文地质评价	26
2.1.1 煤层水的水化学特征	26
2.1.2 水动力(或流体)的控气作用机理	27
2.1.3 古水文地质旋回对煤层气富集的影响	31
2.1.4 水文地质条件对煤层气开发的影响	32
2.2 煤层气的赋存状态与表征	36
2.2.1 游离状态甲烷的状态方程	36
2.2.2 甲烷在水中的溶解	38
2.2.3 基于吸附势理论的甲烷吸附	39
2.3 煤层中气体运移机理	41
2.3.1 甲烷的解吸	41
2.3.2 扩散特征	42
2.3.3 渗流特征	43
第3章 煤层气完井理论及实践	45

3.1	完井方式的选择	45
3.1.1	低渗煤层	46
3.1.2	致密煤层	47
3.2	裸眼完井工艺	48
3.2.1	单层裸眼完井	48
3.2.2	多层裸眼完井	48
3.3	裸眼洞穴完井工艺	49
3.3.1	基本原理	49
3.3.2	应用实例	51
3.4	套管完井工艺与射孔方式	53
3.4.1	套管完井适用条件	53
3.4.2	水力喷砂射孔	54
3.4.3	聚能射孔枪射孔	55
3.5	多煤层套管完井压裂工艺	56
3.5.1	投球式压裂	56
3.5.2	桥塞射孔压裂	58
3.5.3	间接压裂	58
3.5.4	连续油管作业	60
3.6	U型井完井工艺	62
3.7	多分支水平井工艺	62
3.7.1	分支井的井级	62
3.7.2	多分支水平井工艺在煤层气井中的应用	63
第4章	煤层气藏动态评价与水侵计算	65
4.1	煤层气物质平衡方程	65
4.1.1	物质平衡方程推导	65
4.1.2	物质平衡方程的简化	67
4.1.3	地层压力计算	70
4.2	煤层气藏的水侵模型	72
4.2.1	平面径向流水侵模型	74
4.2.2	平面线性流水侵模型	80
4.2.3	垂向水侵模型	81
4.2.4	计算步骤总结	82
4.2.5	计算实例	82
第5章	煤层气井动态评价	85
5.1	拟压力和物质平衡拟时间	86
5.1.1	拟压力定义	86
5.1.2	物质平衡拟时间	88
5.2	煤层气井的产量图版拟合分析	89
5.2.1	Agarwal-Gardner 典型曲线图版制作原理	90

5.2.2	典型曲线图版使用步骤	93
5.3	煤层气井的流动物质平衡方程	94
5.3.1	产纯水阶段的流动物质平衡方程	95
5.3.2	产纯气阶段的流动物质平衡方程	96
5.3.3	气水两相同产阶段的流动物质平衡方程	97
5.3.4	流动物质平衡法(FMB)计算步骤	98
5.4	煤层气井的渗流方程与物质平衡法联解分析	99
5.4.1	气井生产历史拟合与预测	99
5.4.2	相对渗透率曲线计算	101
5.5	煤层气井的经验产能方程	103
5.5.1	Vogel 方程	103
5.5.2	Fetkovich 方程	105
第6章	煤层气排采工艺	107
6.1	煤层气排采方式	107
6.1.1	煤层气排采特点	107
6.1.2	排采强度的影响	108
6.1.3	井群开发井间干扰	108
6.2	气举排采工艺	109
6.2.1	气举排采原理	109
6.2.2	气举井生产分析	110
6.3	电潜泵排采工艺	113
6.3.1	电潜泵排采工艺特点	113
6.3.2	电潜泵装置的组成	114
6.3.3	电潜泵排采参数计算	118
6.3.4	电潜泵排采工艺问题处理	119
6.3.5	电潜泵技术发展	121
6.4	螺杆泵排采工艺	122
6.4.1	螺杆泵工作原理	122
6.4.2	主要技术参数	123
6.4.3	螺杆泵生产管理	124
6.5	排水采气工艺方法选择	126
第7章	抽油机排采工艺及实践	128
7.1	有杆排采系统概述	128
7.1.1	有杆排采系统组成及工作原理	128
7.1.2	游梁式抽油机	129
7.1.3	抽油杆柱系统	136
7.1.4	抽油泵	137
7.2	悬点载荷及泵效计算	139
7.2.1	抽油机悬点运动规律	139

7.2.2	抽油机悬点载荷计算	143
7.2.3	泵效及计算	145
7.3	有杆排采系统效率	150
7.3.1	定义与系统效率分解	151
7.3.2	系统效率简便测试和计算	153
7.3.3	系统效率的提高	153
7.4	有杆泵生产系统优化设计及工况诊断	156
7.4.1	有杆排采生产系统优化设计	156
7.4.2	排水井工况诊断	158
7.4.3	游梁式抽油机的适应性	163
第8章	煤粉产出机理及防治	164
8.1	煤粉形成及产出机理	165
8.1.1	煤粉类型及影响	165
8.1.2	原生煤粉的形成机理	166
8.1.3	次生煤粉的形成机理	169
8.1.4	煤粉运移过程中的堵塞	173
8.2	煤粉产出阶段及特征	174
8.2.1	煤粉产出量的表征	174
8.2.2	井筒携煤粉规律	177
8.2.3	煤层气直井煤粉产出规律	179
8.2.4	煤层气水平井煤粉产出规律	181
8.3	煤粉防治工艺	182
8.3.1	射孔工艺防治煤粉	182
8.3.2	压裂工艺防治煤粉	183
8.3.3	排采工艺防治煤粉	184
第9章	煤层气开采过程中的污水处理	186
9.1	煤层气井的产水量	186
9.1.1	初始水产量	187
9.1.2	产水量的递减特征	188
9.2	污水处理的环保法规	189
9.2.1	北美地区煤层水排放的水质要求	189
9.2.2	Warrior 盆地的环保法规	191
9.2.3	中国的环保法规	192
9.3	污水处理方式	194
9.3.1	污水直接排入河流	195
9.3.2	污水回注地层	198
9.3.3	煤层气采出水综合利用处理方案	199
	参考文献	205

第1章 煤层气藏表征

煤层气是指储存在煤层中以甲烷为主要成分，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，是煤的伴生矿产资源，属非常规天然气，是近一二十年在国际上崛起的洁净、优质能源和化工原料。煤层气与其他类别的天然气相比较特点见表 1.1。

表 1.1 煤层气、页岩气与常规天然气对比

特点	煤层气	页岩气	常规天然气
成因类型	有机质热演化成因和生物成因	有机质热演化成因和生物成因	有机质热演化成因、生物成因和原气裂解成因
主要成分	甲烷为主	甲烷为主，少量乙烷、丙烷	甲烷为主，乙烷、丙烷含量变化大
成藏特点	自生、自储、自保	自生、自储、自保	生、储、盖合理组合
分布特点	受煤层分布的控制，分布比较广	受页岩分布的控制，分布比较广	受生、储、盖组合控制
储集方式	吸附气和游离气并存，吸附气占 80% 以上	吸附气和游离气并存	游离气为主
埋藏深度	一般大于 300m	一般大于 200m	一般大于 500m
开采特点	先排水降压，再解吸开采	天然压力开采加解吸开采	天然压力开采

一个煤层气藏的勘探和开发过程，可以划分 5 个阶段：

1) 区域地质调查阶段

主要任务是调查某一区域的煤层气资源的前景，评价指标包括：天然气储量、气和水的产能、天然气销售前景、污水处理与环保问题等。

2) 详探阶段

主要任务是评价某个特定区块的煤层气是否值得开发，并确定开发的最佳方案。在此阶段，可以同时开展多项评价研究工作，如全井段取心、测井、注入/压降测试、干扰试井（五点井网）和试采（表 1.2）。

表 1.2 详探期间的研究任务

研究目标	研究任务	数据来源
天然气销售前景，选择污水处理方式	根据公开的数据，或区域地质调查阶段的研究结果进行调研	区域地质调查
含气量、等温吸附曲线、解吸时间、天然气储量	岩心分析、测井分析	取心井
各煤层物性对比	地球物理测井	取心井、探井

续表

研究目标	研究任务	数据来源
渗透率	注入/压降试井	取心井、探井
渗透性的各向异性	干扰试井	多井试井（五点井网）
完井工艺决策	注入/压降试井、生产历史拟合	试采井（五点井网）
可采储量、相对渗透率、经济极限	生产历史拟合	试采井（五点井网）

3) 开发早期阶段

在物性好的层段优先部署开发井网，完成预订的开发目标。

4) 稳产期阶段

通过完善开发井网、修井和难动用储量挖潜，完成预订的开发目标，维持经济效益。

5) 递减期阶段

在产量下降阶段，通过增产和环保工艺维持开采效益，包括关闭低产井，拆卸开采设备，并恢复井场。

在表 1.3 和表 1.4 中，列出了在煤层气勘探开发过程的 5 个阶段（详探阶段细分为 3 个小阶段）中采用 10 项技术。这些技术包括：测井解释、气藏工程分析、测试压裂、连续油管压裂技术等。

表 1.3 煤层气勘探开发过程中的应用技术

应用技术	勘探开发阶段						
	1	2.1	2.2	2.3	3	4	5
井网优化					√	√	
取心/岩心分析	√	√					
地球物理测井	√	√	√	√	√		
裂缝渗透率测定	√	√	√	√			
气藏工程分析	√	√	√	√	√	√	√
测试压裂分析			√	√	√		
水力压裂			√	√	√	√	
连续油管多级压裂			√	√	√	√	
提高采收率						√	√
井网加密							√

表 1.4 煤层气勘探开发过程中的测井方法

测井系列	勘探开发阶段				
	1	2	3	4	5
高分辨率补偿能谱密度测井		√	√	√	
高分辨率伽马测井		√	√	√	
高分辨率双源距中子测井		√	√		

续表

测井系列	勘探开发阶段				
	1	2	3	4	5
高分辨率电阻率测井		√	√		
微电极测井		√	√	√	
核磁成像测井		√	√		
微电阻率成像测井		√			
声波测井 (偶极声波)		√			
脉冲中子衰变测井 (套管井)					√
双源距中子测井 (套管井)					√

1.1 煤层气藏形成与资源分布

1.1.1 煤层气藏形成条件

煤层气是一种自生自储的天然气,基本上没有经历大规模的二次运移和聚集作用,它的富集因素与常规天然气有很大的不同,主要取决于煤层本身的发育程度和封盖保存条件的好坏,具体而言,控制煤层气藏的形成条件有煤层厚度及其成分、煤的变质程度、埋藏深度和地质构造条件、煤层顶底板岩性和水文地质条件等。

1. 煤层厚度

从气源岩角度考虑,首先要求煤层有一定的厚度和规模,最丰富的煤层气资源分布在含煤性较好的煤系中。煤层厚度越大,产量越高,这是显而易见的。最理想的情况是煤层厚度较大,煤系厚度适中(一二百米到数百米),有利于煤层气开发。华北石炭-二叠纪煤系厚度不大(一般一二百米),含煤系数较高(约10%)。南方二叠世煤系厚度适中,但煤厚度一般较薄,含煤系数仅1%左右,只有黔西六盘水含煤区煤厚较大,含煤系数较高(6%~7%)。西北早、中侏罗世煤系在西部厚度达2000多m,虽然煤层发育很好,但含煤系数也只有约5%;西北早、中侏罗世煤系在东部厚度较小(一般厚约100m),而含煤系数较高(约10%)。

2. 煤的变质程度

从煤层气生、储条件两个方面,都要求煤的变质程度要适当,若演化程度太低,如还处于褐煤阶段,由于刚进入煤化作用的成岩阶段,在泥炭化作用时形成的生物气已散失殆尽而热解气还未大量生成,因此,褐煤煤田的煤层气含量都很低,即使煤炭储量再丰富,也难以形成煤层气藏。如中国内蒙古东部和东北的西部的诸多晚侏罗世、早白垩世含煤盆地群,以及黑、吉、辽、滇等省绝大多数古近纪和新近纪煤田都属此类。

煤的变质程度对煤的吸附容量也有明显控制作用。在类似的保存条件下,随着煤的变

质程度增高，煤的含气量增大，是生、储条件综合作用的结果。

3. 煤的埋藏深度和构造变动

如图 1.1 所示，一般情况下，造成随着煤层埋深的增大煤的含气量也增加的原因有：

(1) 随着煤层埋藏深度增大，煤的演化程度增高，生气条件变好。

(2) 随着煤层埋藏深度增大，封闭条件相对变好，煤的气体压力增大，在一定压力范围内煤对甲烷的吸附容量增加。



图 1.1 煤化作用阶段及气体生成 (据中联煤层气有限责任公司相关资料)

中国有不少煤田存在煤的含气量随深度增大而增加的现象，如淮南、开滦、潞安、阳泉等，淮南的含气量为 1.3~2.8 m³ / (m·t)，阳泉为 3.8~6.2 m³ / (m·t) 等。

煤层所处构造部位直接影响其含气量。对中国 10 个煤田的统计发现，瓦斯（煤层气）富集区主要分布在褶曲、断裂两侧、鼻状构造、背斜轴部和向斜翘起端。在煤矿瓦斯地质研究中，很多矿区的高瓦斯含量区和瓦斯突出现象，均发生在构造变动带上。因此，矿区中的断层和褶曲的性质、规模及其封闭性能对煤层气的赋存也会起到一定的制约作用。

有的煤田成煤后抬升较高，使煤层埋藏过浅，或使煤层遭受空气氧化作用，或造成煤层气的逸散；更有甚者，断裂发育，使煤层气几乎无法保存。如山东多数煤田和山西霍西煤田，虽然煤的成熟度高，有利于形成煤层气，但煤层含气量很低。

4. 煤层顶底板岩性

煤层顶底板岩石物理性质对煤层气的富集也有重要影响，从封盖性能考虑以泥岩为

好。如辽宁抚顺矿区,由于主煤层的顶板为厚12~185m的页岩,是极为理想的盖层,而成为著名的高瓦斯矿井。又如山西晋城潘庄一号井的3号煤层,当顶板是泥岩时,瓦斯含量为13~24m³/t,顶板为砂岩时则只有4~6m³/t。

从较大范围考虑,华北石炭-二叠纪煤系属海陆交互相沉积,其泥、砂比值较高,透气性较低,易使煤中气体得以保存。而西北、华北、东北的中生代煤系多为陆相沉积,碎屑岩较为发育,而透气性较好,则煤中气体较易渗漏。

5. 水文地质条件

就煤层气保存而言,煤层处于水动力承压区的含气量最高,邻近供水区的含气量较高,位于泄水区则含气量较低。含煤地层压力大于甲烷吸附压力的地区(如承压区)是煤层气保存的最有利区。

地下水对煤层气富集程度的控制作用也有两重性:当地下裂隙十分发育,地下水活动强烈,且与地表连通时,水大量涌出,从而造成煤层气的大量散失,如四川南桐矿区、湖南邵阳矿区均有这类情况;若有承压水充填于煤的孔隙和裂隙之中时,造成水力封闭,则有利于煤层气的富集。

1.1.2 煤层气资源分布

据中国煤炭地质总局对全国的煤层气资源评价结果,全国共获得可采煤层中风化带以下煤层甲烷含量大于或等于4m³/t、埋深2000m以下的煤层气资源量为14.336×10¹²m³。煤层气资源主要分布于华北聚气区和华南聚气区,华北聚气区资源量为9.552×10¹²m³,占66.63%;华南聚气区资源量为4.127×10¹²m³,占28.79%;东北聚气区资源量为4223.24×10⁸m³,占2.95%;西北聚气区资源量为2340.57×10⁸m³,占1.63%;滇藏聚气区没有符合本次评价条件的煤层气资源。

我国煤层气资源量大于10000×10⁸m³的有鄂尔多斯盆地、沁水盆地、六盘水含煤区、准噶尔盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地、豫西-豫东含煤区。资源量为1000×10⁸~10000×10⁸m³的有三江穆棱河含煤区、京唐含煤区、大同宁武含煤区、太行山东含煤区、鲁西含煤区、徐淮含煤区、淮南含煤区、桌贺含煤区、华荃山含煤区、川南黔北含煤区、伊宁含煤区、焉首含煤区和塔北含煤区。

1.2 煤的微观结构特征

1.2.1 煤岩孔隙

煤的孔隙结构与常规天然气储层的孔隙结构不同,常规天然气储层中,天然气是以游离态储集在储层的孔隙中,而煤层气则多以吸附态储集在煤的微孔隙表面。

张慧(2001)、张慧等(2003)根据扫描电镜研究将煤中孔隙的成因类型划分为4大类9小类。刘常洪和杨思敬(1992)等根据孔隙在煤中的赋存特征、陈萍和唐修义

(2001) 针对煤层中瓦斯气的赋存与运动状态、吴俊 (1993) 根据煤中微孔隙的连通性而采用体积比例法分别对煤孔隙进行了划分; 王生维等 (1997) 则从煤储层岩石物理研究和煤层气产出特征来进行分类。胡素云等 (2006) 在霍多特分类的基础上, 并结合周家尧、吴俊、傅雪海、樊明珠、张新民等人的分类研究, 总结归纳了一套孔裂隙系统分类方案 (表 1.5), 内容较为全面具体。

表 1.5 煤储层孔隙系统划分及识别特征 (据胡素云等, 2006)

孔隙类型划分		孔径大小	成因孔隙特征简述	对煤层气的运聚作用		
定性分类	原生孔隙	植物组织孔	一般为 $1.10\mu\text{m}$	成煤植物本身所具有的细胞结构孔	作用小	
		粒间孔	一般为 $2 \sim 30\mu\text{m}$	是显微组分颗粒之间及其间矿物质堆积物之间的一种粒间孔隙	作用小	
		基质孔	一般为 $0 \sim 10\mu\text{m}$	无结构镜质体内的残留孔	作用小	
		晶间孔		矿物晶粒之间的孔		
	次生孔隙	后生孔	角砾孔	煤受构造应力的破坏而形成的角砾之间的孔	作用大	
			碎粒孔	煤受构造应力的破坏而形成的碎粒之间的孔	作用中等	
			淋滤孔	煤中经流水淋滤作用而形成的孔	作用中等	
		变质孔	气孔	一般为 $1\mu\text{m}$	在煤化作用过程中因甲烷等气体的逸出而留下的孔隙	作用中等
		矿物质孔	铸模孔	一般为 $0 \sim 10\mu\text{m}$	因煤层中原生矿物晶体溶蚀而形成的孔隙	作用小
			溶蚀孔		可溶性矿物在长期气、水作用下受溶蚀而形成的孔	
测试定量分类	大孔		$>1000\text{nm}$ ($>2000\text{nm}$)	多以管状孔隙、板状孔隙为主	易于液态烃、气态烃储集和运移, 排烃效果好	
	中孔		$100 \sim 1000\text{nm}$	以板状孔隙、管状孔隙为主, 也有不平行板状孔隙	易于液态烃、气态烃储集和运移	
	小孔		$10 \sim 100\text{nm}$ ($20 \sim 200\text{nm}$)	以平行板状孔为主有一部分墨水瓶孔隙	易于气体储集, 但不利于重烃气体的运移	
	微孔		$<10\text{nm}$	具有较多的墨水孔隙和不平行板状毛细管孔隙	气体能储集, 但不能运移	

在晋城原生结构保留比较完整的煤储层中, 植物组织孔、溶蚀孔少见, 碎粒孔、晶间孔可见, 气孔、角砾孔、铸模孔多见 (表 1.5)。气孔和角砾孔不仅多见, 而且对煤储层性能影响较大。

1. 气孔

气孔是煤变质过程中由煤层的生气和聚气作用而形成。扫描电镜可分辨的单个气孔的孔径范围主要为 $0.01 \sim 2\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 左右者多见, 形状以圆形为主, 其次有椭圆形、水滴形等。气孔主要发育于镜质组中, 分布不均匀, 总体连通性不好。气孔多见于新鲜

的煤岩断面，放大倍数大于1000倍，方可显现。气孔密集处是煤层气初级运移和储集的重要场所。

晋城煤储层中常有若干个气孔密集分布，组成气孔群（图1.2a）、气孔窝（图1.2b）、气孔带。密集分布的气孔局部还常有破裂、连通、变大的现象。气孔多见且密集分布是晋城煤储层的重要孔隙特征，也是该煤储层生气、储气能力强的一个直接见证。

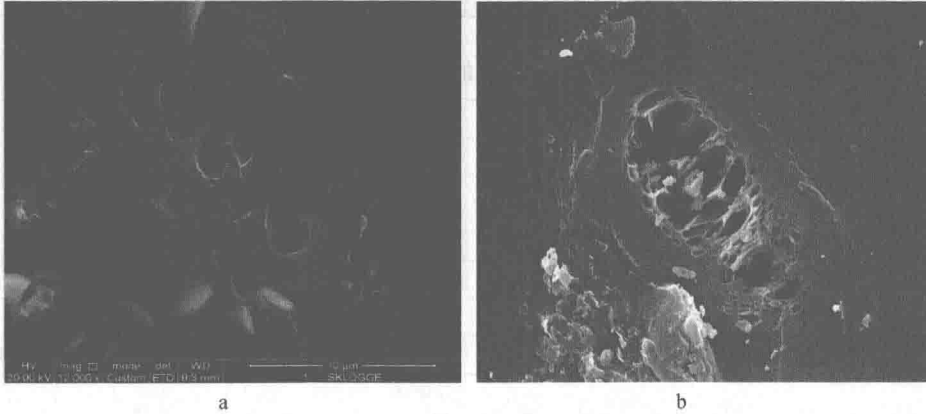


图 1.2 煤层孔隙特征（据中联煤层气有限责任公司相关资料）

a. 气孔群；b. 气孔窝

2. 角砾孔

角砾孔是煤层受地质构造作用破坏而形成的角砾之间的孔。角砾呈直边尖角状，相互之间位移很小或没有位移。扫描电镜下角砾的大小界定为大于 $10\mu\text{m}$ ，角砾孔的大小以 $2\sim 10\mu\text{m}$ 者居多，均属大孔级（ $>1\mu\text{m}$ ）孔隙。角砾孔主要发育于镜质组中，多出于两组裂隙交汇处或裂隙密集处，局部连通性较好。

1.2.2 煤岩裂隙

在煤矿或煤层气井取心时，可发现煤具有天然裂缝网络。裂缝网络受煤化作用、构造作用等影响而形成。煤中裂缝的称谓较多，如节理、割理、裂缝、裂隙等。在我国煤田地质领域，一般把裂缝称为“裂隙”。根据成因，可以把煤岩学上的两类裂隙（内生和外生）扩展为7个小类（表1.6）。苏现波和林晓英（2009）认为国外煤层气藏工程中提及的“割理”是指内生裂隙，外生裂隙则是构造应力作用的产物，二者的差别见表1.7。

表 1.6 煤中裂隙的成因类型（据张慧，2001）

分类		成因简述
内生裂隙	失水裂隙	煤层在压实、失水、固结等变化过程中形成的裂隙
	缩聚裂隙	煤在变质过程中脱水、脱气、脱挥发分所形成的裂隙
	静压裂隙	煤层在上覆岩层单向静压作用下形成的定向裂隙

续表

分类		成因简述
外生 裂隙	张性裂隙	由张应力作用而产生的启开状裂隙
	压性裂隙	由压应力作用而产生的闭合状裂隙
	剪性裂隙	由剪应力作用而产生的两组或多组共轭裂隙
	松弛裂隙	构造面上的糜棱质由应力释放而产生的裂隙

表 1.7 内生裂隙（割理）与外生裂隙的识别特征（据苏现波、林晓英，2009）

内生裂隙（割理）	外生裂隙
割理的力学性质以张性为主	外生裂隙可以是张性、剪性、及张剪性等
割理在横向或纵向上都不穿过不同的煤岩类型或界限，一般发育在镜煤或亮煤条带中，遇暗煤条带或丝质终止	外生裂隙不受煤岩性质的限制
割理面垂直或近似垂直于层理面	外生裂隙面可以与层理面以任何角度相交
割理面上无擦痕一般平整	裂隙面上有擦痕、阶步、反阶步
割理中充填方解石、褐铁矿及黏土，极少有碎煤粒	外生裂隙中除了方解石、褐铁矿、黏土外，还有碎煤粒

煤的割理分为面割理和端割理，两种割理系统正交。延伸长度大、发育程度好的割理称为面割理，面割理是主要的割理；延伸长度短，发育程度差，垂直于面割理而被夹于两条面割理之间的割理称为端割理，端割理是次要的割理。如图 1.3 所示。面割理基本上是连续的，通常垂直于水平应力，一般呈板状延伸，连续性好，缝壁光滑，形成煤层中的主要割理组。端割理不连续，发育于面割理之间，通常与水平应力平行，缝壁不规则，形成煤层中的次要割理组。面割理的延伸长度可达几百米，端割理只发育于两条面割理之间。相邻两条割理之间的距离称为割理间距，其尺寸从 0.1in^① 到 1in 不等，在构造活动强烈的区域割理间距小。

煤具有微孔结构，孔隙半径为 $5 \times 10^{-10} \sim 10 \times 10^{-10} \text{m}$ 。微孔结构具有非常低的渗透率，而割理系统渗透率相对较高。在煤层气渗流过程中，首先以扩散作用运移到煤层割理中，然后通过割理渗流至井筒。Warren-Root 的双孔系统可有效地表征出煤的孔隙特征，割理系统如图 1.3 所示。

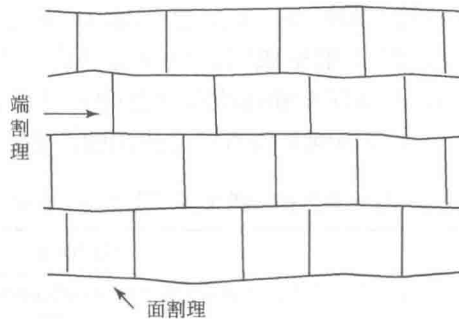


图 1.3 割理类型示意图

① 1in=2.54cm。