

CBM AVO Technology

煤层气 AVO 技术

陈信平 霍全明 林建东 等著

石油工业出版社

煤层气 AVO 技术

陈信平 霍全明 林建东 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书记录了笔者多年来在煤层气 AVO 技术基础理论方面的研究心得。全书共分 7 章,阐述了煤层气 AVO 技术的岩石物理基础、地震波理论基础、AVO 正演数值模拟在煤层气井评价中的应用、使用 AVO 反演成果预测煤层气富集高渗区,并以此指导勘探井、开发井井位部署等内容。

本书可供从事煤层气勘探开发的工程技术人员和科研人员以及高等院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层气 AVO 技术/陈信平等著. —北京:石油工业出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-5183-0198-0

I. 煤…

II. 陈…

III. 煤层-地下气化煤气-探井-研究

IV. P618. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 098528 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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 327 千字

定价: 75.00 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 AVO 技术》编写组

组 长：陈信平 霍全明

副组长：林建东 李景明

成 员：汪 洋 胡朝元 孙粉锦 赵庆波 李贵中

温声明 赵培华 邱 杰

序 言

开发煤层气能够提供高热值的气体能源、改善煤矿安全生产条件、减少温室气体排放，是一举三得、利国利民的好事。但是，在大多数情况下，这一举三得的好事只有进行煤层气地面开发才能够实现。

我国是煤炭和煤层气资源大国，煤层气资源量居世界第三位，总资源量达到 36 万亿立方米，可采资源量超过 10 万亿立方米，有条件成为煤层气生产大国。经过二十多年的努力，我国的煤层气产业已经初具规模，2012 年煤层气总产量达到 125 亿立方米，已经在国家能源产品序列中占有一席之地。但是，喜中有忧，125 亿立方米总产量中，煤矿井下抽排 99 亿立方米，占了总产量的 79%，专业煤层气公司地面开发 26 亿立方米，仅仅占总产量的 21%，本来应该是煤层气生产主力军的专业煤层气公司却是一个陪衬。国家发展与改革委员会《煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十二五”规划》规定：2015 年煤层气产量达到 300 亿立方米，其中地面开发 160 亿立方米，煤矿瓦斯抽采 140 亿立方米。2012 年我国地面开发煤层气产量 26 亿立方米，仅完成“十二五”规划年度地面开发预期年产量（45 亿立方米）的 58%，情况不容乐观。

专业煤层气公司要从陪衬变为主力军，承担起本应属于自己的角色，至少要在如下三方面有所作为。首先，遵循新兴产业的发展规律，以科技为基础，采用新技术新方法。其次，遵循煤层气自身的规律，认清煤层气局部富集高产的现实，克服“有煤就有气”的传统观念，把井打在煤层气储层中富集高渗的部位。第三，遵循我国煤层气特有的规律，根据我国煤层气储层“三低一高”（低压、低渗、低饱和、高含气量）的特点，发展适合这些特点的技术流程和工艺。

陈信平等的新著《煤层气 AVO 技术》为煤层气行业提供了一个选择。该书从煤层气吸附赋存的基本特征出发，根据多种实测资料发现了煤层气储层含气量与储层弹性参数之间的负相关关系，并据此建立了煤层气储层含气量、渗透率与 AVO 异常之间的关联关系。该书将这些负相关关系作为煤层气 AVO 的岩石物理基础，根据 Zoeppritz 方程组的弹性模量近似式解释煤层气储层的 AVO 响应特征形成的原因，据此提出了解释煤层气 AVO 异常的基本原则，初步探讨了煤层气 AVO 异常多解性问题。所有这些，在国内和国际地球物理学界，都属于创新性的观点。

该书将上述理论应用于实践，拓展了煤层气 AVO 技术的两个应用领域，即预测煤层气储层富集高渗部位和在压裂试气前评价煤层气井获得工业气流的可能性。AVO 技术评价煤层气井提供了煤层气井产量与 AVO 响应特征之间的相关性，从一个侧面证明了该书倡导的煤层气 AVO 理论的正确性和可行性。

该书提出的煤层气 AVO 岩石物理理论建立在对三个煤层气矿区相关资料所做统计分析的基础上，参与统计分析的各个数据体都不是很大。虽然作者力图证明煤层气储层含气量与其弹性参数之间的负相关关系是普遍存在的，因而其岩石物理基础对于中、高煤阶水饱和煤层气储层是普遍适用的，尽管目前看来这个证明是可以自圆其说的，但是，这个证明目前仍

然是定性的和逻辑推理性的。因此，这些负相关关系的普遍性还有待更多矿区的更多资料的证实，理论的正确性也有待生产实践成果的进一步检验。

该书开启了煤层气 AVO 研究和实践活动的一扇门，为研究者提供了一个新的思路和新的观察视角，为煤矿瓦斯抽采和煤层气地面开发生产企业提供了一项可以试用的新技术。希望煤层气生产企业试用该技术。希望更多的研究者参与煤层气 AVO 研究，也希望作者继续努力，加强与煤层气生产企业的合作，在实践中修正、丰富、完善煤层气 AVO 理论与技术，为快速发展煤层气产量做贡献。

中国工程院院士：何廷晋

2013 年国庆

前 言

是否有必要使用直接碳氢检测技术提高煤层气勘探开发效益？AVO^①技术是否能够被用于煤层气勘探开发？对于这些问题，地震勘探学界、煤层气行业都是有争论的。本书总结了笔者多年来对这些问题的思考、试验、实践的成果，奉献给诸位同行。

本书的书名是《煤层气 AVO 技术》，以彰显煤层气 AVO 技术与天然气 AVO 技术之本质的不同。

在写作中，笔者注意了如下几点：

(1) 讲清楚煤层气 AVO 技术的理论问题。本书的重点是阐述煤层气 AVO 技术理论，涉及理论问题的，毫无保留地讲细讲深讲透；涉及操作实践问题的，特别是那些与天然气 AVO 技术雷同的操作技巧，则点到为止。由于煤层气在煤层中的赋存状态与天然气在砂岩等储层中的赋存状态完全不同，勘探煤层气的 AVO 技术理论应当不同于勘探天然气的 AVO 技术。20 世纪 90 年代美欧地球物理学界将 AVO 技术应用于煤层气勘探开发的探索之所以失败，主要是因为没有理论创新，生搬硬套地将天然气 AVO 技术用于解决煤层气的问题。多年来，笔者致力于煤层气 AVO 技术理论创新，有些许收获。这些理论创新虽有初步应用成果，但是，还不够。因此，本书致力于向读者交代研究煤层气 AVO 技术岩石物理基础和地震波理论基础之所得，以达到抛砖引玉之目的，期待更多的人参与煤层气 AVO 理论创新和应用。

(2) 尽可能提供应用实例。一个好的勘探实例，胜过多个鸿篇巨论。一个完整的煤层气 AVO 勘探实例，至少应当包括矿区弹性参数研究、AVO 响应特征研究、煤层气井评价、地震资料 AVO 反演和异常解释等。笔者为煤层气 AVO 技术应用的各个阶段提供了尽可能多的应用实例。

(3) 多与天然气 AVO 技术作对比。部分煤层气勘探开发人员来自石油天然气行业，或多或少地熟悉天然气 AVO 技术的理论、方法和实践，有的甚至是天然气 AVO 技术专家。即使新加入煤层气行业的大学生、研究生，在校期间也或多或少地学习过天然气 AVO 技术的理论基础。多与天然气 AVO 技术作对比，既有助于读者利用既有知识接受煤层气 AVO 技术的理论和方法，也有利于改变当前将天然气 AVO 技术生搬硬套地误用于煤层气勘探开发的现状。

(4) 架设煤层气地质专家与地震勘探专家之间互相沟通的桥梁。首先，一项技术在煤层气勘探开发中是否可行、是否值得推广应用，最终是由煤层气地质专家说了算。因此，笔者尽力减少繁杂的数学推导，尽量使用通俗的语言陈述地震勘探理论，保证读者只要有微积分基础和地震勘探常识，都能够顺畅地理解本书的内容。其次，煤层气 AVO 技术是由地震勘探专业技术人员实施的，他们一般不熟悉煤层气地质理论，甚至缺少煤层气基础知识。因

① AVO—Amplitude Versus Offset，即地震反射波振幅随偏移距的变化。

此，第1章中介绍了煤层气基础知识，并在其余章节中根据需要随时补充这样的知识，甚至不惜冒臃肿或啰唆的风险重复某些重要的或与油气知识相冲突的煤层气概念。即使地震技术人员完全没有煤层气的ABC，也不会因此而在阅读本书时遇到大的障碍。若诚如所愿，本书能够成为煤层气地质专家与地震勘探专家之间互相沟通的桥梁，则必将有利于煤层气AVO技术的争鸣和发展。

煤层气AVO技术经历了将近20年的发展—停滞—再发展的历史。美国人在20世纪90年代早期曾经致力于将AVO技术移植到煤层气勘探开发中，其巅峰成果是科罗拉多矿业学院1997在美国的《Geophysics》杂志上发表的文章。澳大利亚、加拿大、法国等国家的大学和研究机构也开展过煤层气AVO研究。但是，他们的研究或无疾而终或成果没有被煤层气行业认可。西方地球物理学界从90年代晚期开始放弃了煤层气AVO研究。以中国矿业大学彭苏萍教授为代表的中国学者从21世纪初期起，为中国煤矿安全和煤层气开发之需要，重新开始了西方已经放弃的煤层气AVO研究，在淮南煤矿瓦斯预测方面取得了成效。中国石油勘探开发研究院廊坊分院自2008年起，在科技重大专项下设立了煤层气AVO专题，由中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院组织实施。但是，迄今为止，煤层气AVO技术尚未获得煤层气行业主流的认可。本书所述之内容，可能是一隅之言，也可能揭示了自然界客观存在的普遍规律。所有这些，有待未来实践的验证。尽管如此，笔者相信，本书倡导的理论和方法已经具有实用价值，积极、慎重、正确地使用本书倡导的方法，有可能为煤层气企业带来立竿见影的效益。期待煤层气企业有远见的高管放弃“以钻井工程为主导”的现行技术模式，用好煤层气AVO技术，早日转变到“预测指导下的钻井工程”技术模式。

中国石油天然气集团公司对煤层气AVO研究项目的投资，对于研究工作和本书的出版，起到至关重要的推动作用。中石油（北京）煤层气有限责任公司接铭训、李景明、温声明、杨秀春等同志在多年研究工作中给予了诸多帮助；中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院孙宇菲、邱杰等同志绘制和修改本书的插图，不辞辛苦；特致衷心感谢。

本书研究工作得到国家重大科技攻关项目的资助（项目编号：2008ZX05062，2009ZX05062，2011ZX05033和2011ZX05062）。感谢北京捷茂迪华能源技术有限公司、中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中石油（北京）煤层气有限责任公司对研究工作和本书出版的管理与支持。

陈信平

2013年9月30日

目 录

第 1 章 煤层气基本知识与其储层的基本特性	(1)
1.1 煤层气及其储层的四双特性	(1)
1.2 本书涉及的煤层气常用术语	(27)
1.3 煤层气的生成	(33)
1.4 煤层气井高产的两个最主要因素	(35)
参考文献	(37)
第 2 章 煤层气 AVO 技术的岩石物理基础	(38)
2.1 天然气 AVO 技术的岩石物理基础对煤层气 AVO 技术的适用性	(38)
2.2 煤层气储层含气量与储层弹性参数之间的关系	(48)
2.3 对含气量与弹性参数之间负相关关系的解释	(59)
2.4 煤层气 AVO 技术的岩石物理基础——高、中煤阶水饱和煤层气储层	(69)
2.5 煤层气 AVO 技术的岩石物理基础——高、中煤阶非水饱和煤层气储层	(78)
2.6 煤层气 AVO 技术的岩石物理基础——低煤阶煤层气储层	(79)
参考文献	(80)
第 3 章 煤层气 AVO 技术的地震波理论基础	(82)
3.1 天然气 AVO 技术的地震波理论基础对煤层气 AVO 技术的适用性	(82)
3.2 煤层气 AVO 技术的地震波理论基础	(89)
3.3 建立煤层气 AVO 技术新的岩石物理基础和地震波理论基础的后继影响	(101)
3.4 $(A-B)$ ——煤层气的最佳碳氢检测因子	(103)
3.5 本书所述煤层气 AVO 技术的地震波理论基础对各类煤层气储层的适用性	(105)
参考文献	(106)
第 4 章 煤层气 AVO 正演数值模拟及其在煤层气井评价中的应用	(107)
4.1 概述	(107)
4.2 煤层气 AVO 正演数值模拟的基本作用	(108)
4.3 煤层气 AVO 正演数值模拟在 D 区勘探井评价中的应用	(114)
4.4 煤层气 AVO 正演数值模拟在 E 区勘探井评价中的应用	(132)
参考文献	(144)
第 5 章 地震资料 AVO 预处理	(146)
5.1 概述	(146)
5.2 审查地震资料煤层气 AVO 预处理成果的质量	(147)
第 6 章 煤层气 AVO 反演和异常解释	(149)
6.1 概述	(149)
6.2 煤层气 AVO 反演	(150)
6.3 解释煤层气 AVO 异常的几个注意点	(151)

6.4	G 矿区煤层气储层富集高渗区预测	(162)
6.5	H 煤矿区瓦斯富集危险区预测	(175)
6.6	煤层气 AVO 成果对煤矿瓦斯防治的意义	(182)
	参考文献	(183)
第 7 章 实现煤层气勘探开发技术模式的转变——从美国的“以钻井工程为主导”		
	技术模式转变到中国的“预测指导下的钻井工程”技术模式	(184)
7.1	煤层气勘探开发更需要直接碳氢检测技术	(184)
7.2	美国的煤层气勘探开发方法是“迫不得已退而求其次”的方法	(186)
7.3	转变煤层气勘探开发的技术模式	(187)
7.4	中国煤层气勘探开发特别需要“预测指导下的钻井工程”	(190)
7.5	煤层气 AVO 技术是必然的和优先的选择	(191)
	参考文献	(196)

第1章 煤层气基本知识与其储层的基本特性

1.1 煤层气及其储层的四双特性^[1-6]

煤层气是自生自储的，煤层既是煤层气的源岩，又是煤层气的储层。煤层气及其储层，与常规天然气及其储层比较，有明显不同的特征。煤层气及其储层的特征可以概括为“四双特性”，即双相孔隙（dual porosity systems）、双相赋存（dual storage states）、双相运移（dual flowing modes）和双向流动（dual flowing directions）。本节分为4个小节，分别讲解煤层气及其储层的这4个方面的特性。

理解了煤层气及其储层的四双特性，将基本上拥有了使用煤层气 AVO 技术所需要的煤层气基础知识。如果读者在阅读本节时遇到难懂的名词或术语，妨碍理解，请查阅本书 1.2 节。

1.1.1 煤层气储层的双相孔隙特征

“双相孔隙储层”这个概念是常规油气勘探工作者提出的^[7]，见图 1.1 (a)。在常规油气勘探中，双相孔隙储层并不多见，因此，这个概念也不为大多数常规油气勘探工作者所熟悉。但是，他们创造的理想化双相孔隙储层模型 [图 1.1 (b)] 与实际的煤层气储层图 1.1 (c)、图 1.1 (d) 十分相近，更适宜于描述煤层气储层，因为，与裂隙型常规油气储层的裂隙和洞穴（例如，致密砂岩的裂隙、石灰岩的裂隙和溶洞）比较，煤层的割理、裂隙构成的裂隙型孔隙体系更接近于图 1.1 (b) 模型中的裂隙体系。

煤层气储层是典型的双相孔隙储层。煤层中的割理、裂隙构成了煤层气储层的裂隙型孔隙体系。裂隙型孔隙体系将煤体切割成一系列形态或基本相同或某种相似或差异很大的基质块，这些基质块中的大、中、小、微孔隙构成了煤层气储层的基质型孔隙体系。裂隙型孔隙体系基本上决定了煤层气储层的渗透率，对煤层气赋存也有辅助作用。基质型孔隙体系中孔隙的比表面积^❶很大，是煤层气赋存的主要空间，其发育程度是影响煤层吸附煤层气能力的最重要因素；由于基质型孔隙的连通性差，它们对渗透率的贡献仅有辅助作用。

煤层气储层的双相孔隙特征源自煤层的组成成分、经历的煤化作用、构造运动，是多种因素共同作用的结果。双相孔隙特征影响煤层气的吸附、解吸、扩散、渗流，是煤层气储层研究的重要内容，是煤层气井压裂、排采设计的重要参数，也是导致煤层气 AVO 技术与天然气 AVO 技术之间本质差异的重要原因。

❶ 在本节中，使用“斜体加黑加下划线”的格式突出显示一些不太常见的术语。读者可以在 1.3 节“煤层气常用名词术语”中查阅这些术语的释义。

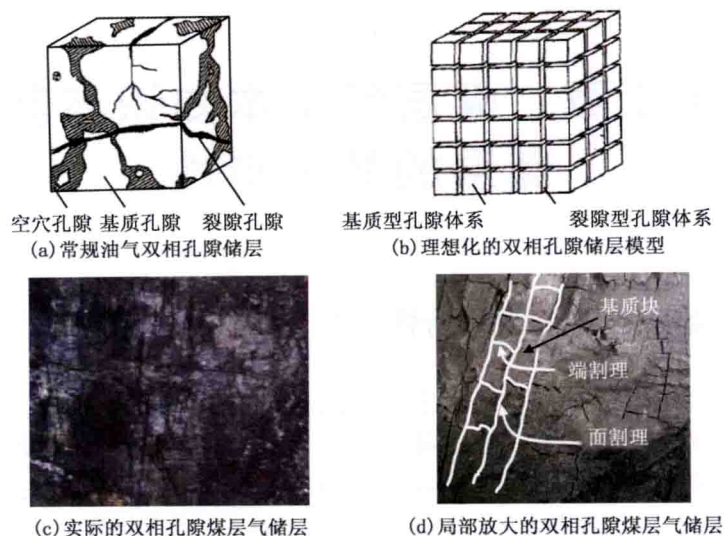


图 1.1 双孔隙常规油气储层与双孔隙煤层气储层

1.1.1.1 基质型孔隙体系 (matrix porosity system)

煤可以简单地被视为古代植物的化石，虽然它不完全是植物的化石，而是植物化石、矿物质、水以及多种气体成分的复杂混合物。由于煤的组成成分复杂，各种成分对煤化作用、构造运动的反响差异大，因此，基质型孔隙体系中的孔隙形态、尺度差异很大。

煤岩学和煤层气地质学已经对煤层的基质型孔隙做了长时期的深入研究。但是，由于基质型孔隙本身的复杂性，研究者对于甚至一些简单的问题也没有统一意见。例如，对于按孔径大小将孔隙分级，没有完全一致的级别和标准，见表 1.1。

表 1.1 煤基质型孔隙分类一览表
(据苏现波和林晓英, 2007; 傅雪海等, 2007; 有修改)

研究者	孔径 (nm)			
	微孔	小孔 (或过度孔)	中孔	大孔
ХОДОТ В. В. [8] (1961)	<10	10 ~ 100	100 ~ 1000	>1000
Gan 等 (1972) [9]	<1.2		1.2 ~ 30	>30
国际理论和应用化学联合会 (1972)	<0.8 (亚微孔)	0.8 ~ 2 (微孔)	2 ~ 50	>50
吴俊 (1991)	<10	10 ~ 100	100 ~ 1000	1000 ~ 15000

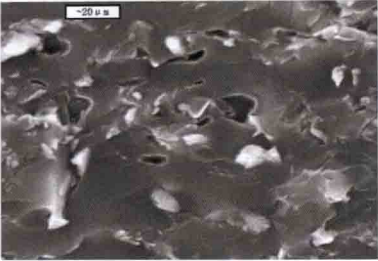
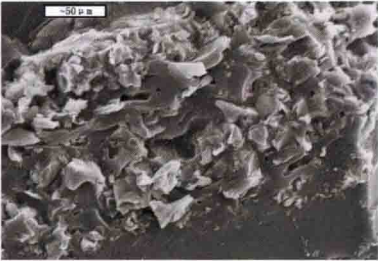
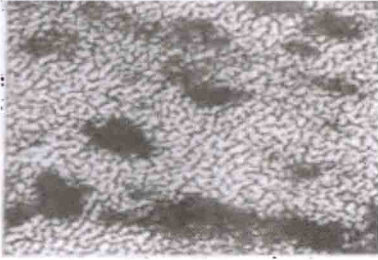
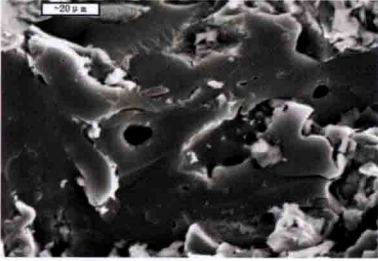
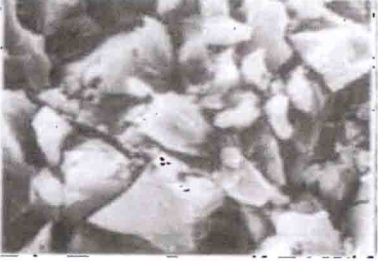
(1) 基质型孔隙的大小分级。

基质型孔隙尺度差异大，最大孔径达到毫米级，最小孔径小于 1nm，大小相差达到 6 ~ 7 个数量级。对于如何确定孔隙分级的名称，划分大孔、中孔、小孔和微孔尺度，各家意见不同，比较流行几种分级标准见表 1.1。

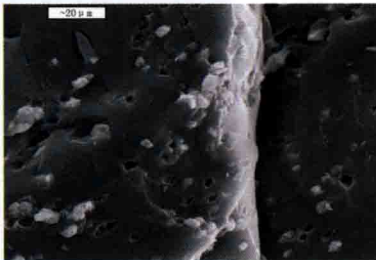
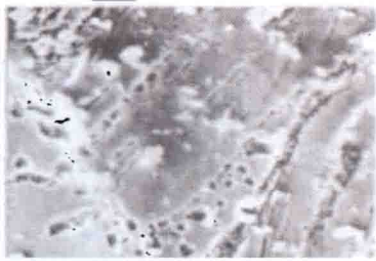
(2) 基质型孔隙的成因分类。

张慧^[10] (2001) 以煤岩显微组分以及煤的变质和变形特征为基础，以大量的扫描电镜观察结果为依据，将煤孔隙的成因类型划分为四大类 10 小类，见表 1.2。该表第三列的扫描电镜 (SEM) 照片提供了基质型孔隙的直观印象。

表 1.2 煤基质孔隙的类型、成因和典型图像
(据张慧, 2001; 傅雪海等, 2007; 有修改)

类型		成因简述	扫描电镜 (SEM) 照片 (仅供参考)	SEM 放大倍数及 相关说明
原生孔	植物组织孔 (或胞腔孔)	成煤植物本身组织结构的继承性孔隙		×3000 残留的变形胞腔孔
	屑间孔	碎屑镜质组、碎屑惰质体和碎屑壳质体等碎屑状颗粒之间的孔隙		×1000 气孔、碎屑镜质组
变质孔	链间孔	凝胶化物质在变质作用下缩聚而形成的链之间的孔隙		×10500 (据张慧, 2001)
	气孔	煤变质过程中由生气和聚气作用而形成的孔隙		×2000
外生孔	角砾孔	煤受构造应力破坏而形成的角砾之间的孔隙		×770 (据张慧, 2001)

续表

类型		成因简述	扫描电镜 (SEM) 照片 (仅供参考)	SEM 放大倍数及 相关说明
外 生 孔	碎粒孔	煤受构造应力破坏而形成的碎粒之间的孔隙		×2240 (据张慧, 2001)
	摩擦孔	压应力作用下面与面之间因摩擦而形成的孔隙		×400 (据张慧, 2001)
矿 物 质 孔	铸模孔	煤中矿物质在有机质中因硬度差异而铸成的印坑		×2000
	溶蚀孔	可溶性矿物在长期气、水作用下受溶蚀而形成的孔隙		×700 碳酸盐薄膜上的溶蚀孔 (据张慧, 2001)
	晶间孔	矿物品粒之间的孔隙		×910 高岭石和石英的晶间孔 (据张慧, 2001)

(3) 基质型孔隙的形态。

孔隙的形态（或结构）影响煤层气向割理、裂隙等流动通道的扩散运移。煤层气的产出过程、压降的控制等，与储层的孔径结构、孔隙类型有着密切的关系。因此，研究孔隙形态对煤层气开发有实用意义。De Bore 按压汞测试中的压汞滞后环特征将孔隙区分为 A、B、C、D 和 E 五种结构类型^[11]，见图 1.2。请注意该图中第三列的文字描述，特别是其中阐述的孔隙形态对煤层气赋存、扩散、运移等的影响。

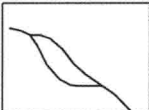
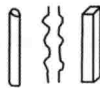
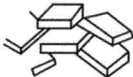
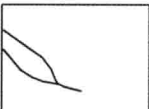
		两端都开放的管状毛细孔 压入压力=退出压力，较粗的A类孔隙利于油气运移	A
		平整壁狭缝状毛细孔隙， 它有利于油气运移和煤体破坏	B
		锥型或双锥型管状毛细孔隙， 多出现于基质镜质组中	C
		四面都开放的尖壁型毛细孔， 板间不平行	D
		具有细颈管状或墨水瓶状孔隙， 它得于油气保存，但不利于运移	E
大 孔隙压力 小 小 孔隙半径 大	压汞滞后环曲线对应的 孔隙模型	特 征	类型

图 1.2 煤基质孔隙结构模型（据苏现波和林晓英，2007，有修改）

(4) 定量描述基质型孔隙的参数。

一般使用 3 个参数定量描述基质型孔隙：

①总孔容（或称之为“比孔容”）。孔容是煤中的孔隙体积，常常使用比孔容表示，即每克煤所具有的孔隙体积，单位： cm^3/g 。“比孔容”是相对于“比表面积”引申出来的术语，可以参考后者之释义以理解前者。

②比表面积。每克煤所具有的孔隙的外表面积与内表面积之和， cm^2/g 。

③孔隙度 ϕ 。单位体积煤中孔隙所占的体积。该定义与常规油气储层相同，此不赘述。

另外，常规油气储层研究也使用有效孔隙度，指单位岩石中互相连通的可允许流体在其中流动的孔隙体积所占的体积。由于煤层的基质型孔隙基本上是不连通的，对储层渗透率贡献可以忽略，因此，煤层气研究中一般不测定也不使用有效孔隙度这个参数。

(5) 影响基质型孔隙的因素。

①煤化作用程度和类型。

煤化程度（即变质程度）与基质型孔隙的关系最密切，其影响涉及基质型孔隙特征的

方方面面。一般说来，人们用煤的镜质组反射率表示其变质程度，甚至也将镜质组反射率称为煤阶，按照镜质组反射率（煤阶）将煤概略地分为高阶、中阶和低阶煤， $R_{o,max} < 0.7\%$ 的为低煤阶， $0.7\% < R_{o,max} < 1.9\%$ 的为中阶煤， $R_{o,max} > 1.9\%$ 的为高阶煤。图 1.3 和图 1.4 分别展示了煤的总孔容、总比表面积随镜质组反射率增大而变化情况。人们也已经研究了煤的大孔、中孔、小孔和微孔等各级别孔隙的总孔容、总比表面积随镜质组反射率的变化，并绘制了类似图 1.3 和图 1.4 的图形，需要时请参考文献 [3] 第三章第三节、文献 [4] 第二章第一节。图 1.3 和图 1.4 均引自苏现波和林晓英（2007）。

煤化作用类型〔即深成（或区域）变质作用、岩浆变质作用、动力变质作用等〕对煤的孔隙分布也有一定影响。例如，当煤化程度相同或相近时，岩浆热变质作用的煤比深成变质作用的煤富含更多气孔。

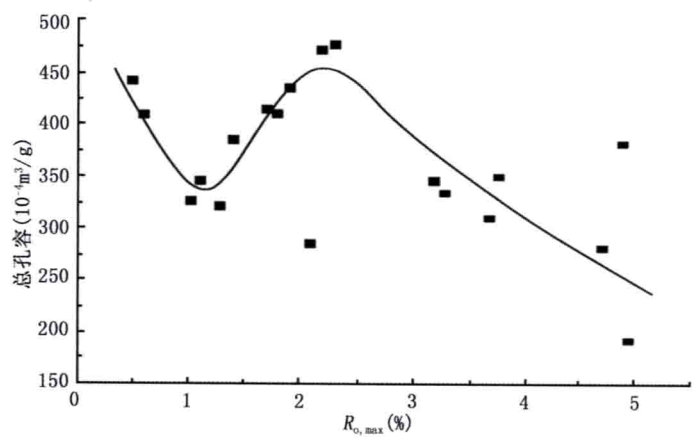


图 1.3 总孔容与镜质组反射率（煤阶）的关系

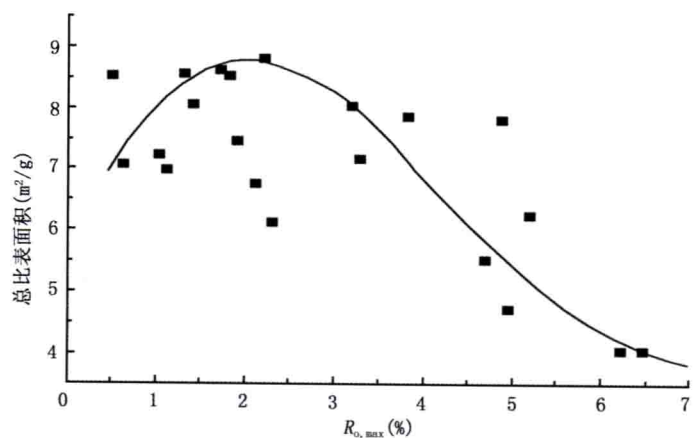


图 1.4 总比表面积与镜质组反射率（煤阶）的关系

②其他影响因素。

煤的显微组分的类型、矿物含量、煤体结构、断裂等因素，都影响煤的基质型孔隙的发育，详见参考文献 [3] 第三章第三节、文献 [4] 第二章第一节。

(6) 基质型孔隙对煤层气储层的重要性。

基质型孔隙的比表面积很大。研究表明^[3]，无烟煤的比表面积最大，约 $230\text{m}^2/\text{g}$ ；其次为褐煤，比表面积约 $200\text{m}^2/\text{g}$ ；高煤阶烟煤比表面积约为 $150\text{m}^2/\text{g}$ ；低中煤阶烟煤最小，比表面积约为 $60\sim 80\text{m}^2/\text{g}$ 。比表面积变化反映了煤化过程中煤分子空间结构的变化。

如果煤的比表面积为 $200\text{m}^2/\text{g}$ ，那么， 20g 煤的比表面积相当于一个足球场的面积， 1kg 煤的比表面积等于 50 个足球场的总面积。90% 以上的煤层气以吸附态赋存在煤层中，在其他条件相同的情况下，比表面积的大小决定了煤层吸附煤层气的能力。

煤之所以有这么大的比表面积，主要是因为煤层中有大量的肉眼不可见的微孔隙（粒间孔、晶间孔等），它们的直径大小只有几个到几十个埃（ $\text{\AA}$ ）。虽然割理、裂隙的内表面积对煤的总比表面积也有所贡献，但是，它们的贡献与微孔隙的贡献比较，具有数量级的差别。因此，基质型孔隙——主要是基质型孔隙中的微孔隙——决定了煤的比表面积的大小，也决定了煤吸附煤层气的能力，是影响煤层气储层含气量的最主要因素。不同煤阶煤含气量大小差别，主要是因为不同煤阶煤的微孔隙发育程度的差别。

1.1.1.2 裂隙型孔隙体系^① (fracture system)

1.1.1.2.1 裂隙型孔隙对煤层气储层的重要性

煤中裂隙是自由态煤层气流动的通道，是煤层渗透率的决定性因素。基质型孔隙基本上是不连通的，即使煤层中的大孔隙与中孔隙（残留植物组织孔、气孔、次生孔隙等）也基本上是不连通的，它们对渗透率的贡献很小。煤层气储层是低渗透率储层，裂隙发育，从而具有适度的原始渗透率（例如，达到 $0.1\text{mD}^{[12]}$ ），是煤层气井高产的必要条件。此外，一定量的原始裂隙密度也是取得较好压裂效果的必要条件，压裂后渗透率深受原始渗透率的影响。

1.1.1.2.2 煤中裂隙的分类

(1) 按成因、形态、组合关系分类。苏现波和林晓英（2007）等从裂隙成因和形态两方面入手，根据成因将煤中裂隙分出 3 类；根据成因和形态细分为 9 个组；最后根据形态与组合关系区分为 17 个类型，见表 1.3。

苏现波和林晓英（2007）认为割理与外生裂隙存在明显的区别，见表 1.4。煤层气 AVO 技术人员没有多大必要区分割理与外生裂隙，但是，该表进一步详细描述了割理、外生裂隙的特征，可以视为对表 1.3 中割理、外生裂隙定义和特性的补充说明，值得研读。

① 将英文“fracture system”翻译为“裂隙型孔隙体系”，好像有点违背“信达雅”翻译三原则中的“信”之原则，因为英文原文中并没有“pore（孔隙）”这个词；并且笔者也注意到，文献中已经有著者将“fracture system”翻译为“裂隙体系”。笔者之所以这样“明知故犯”，是因为（1）在汉语中，“孔隙”一词是“孔”+“隙”，“孔”是形态接近圆形的空间，“隙”是形态狭长的空间；（2）在英文中，煤层中的裂隙与孔隙都是 void space（空的空间）；（3）煤层的裂隙与孔隙在形态和成因上既有明显差别，又不是泾渭分明的，例如，有些成因上属于孔隙的 void space，在形态上是名副其实的裂隙；（4）目前，各家研究者将分割煤体成为基质块的 void space 称为裂隙，将基质块内的 void space 称为孔隙；在此情况下，按哪个级别的裂隙划分基质块，决定一个 void space 属于孔隙还是属于裂隙；例如，如果根据小裂隙划分基质块，那么，微裂隙和显微裂隙就是基质块内的 void space，属于基质型孔隙；如果根据中裂隙划分基质块，那么，小裂隙、微裂隙和显微裂隙都是基质块内的 void space，都属于基质型孔隙；（5）“裂隙型孔隙体系”与“基质型孔隙体系”文字上具有对称性，汉语讲究对仗，这样翻译符合汉语习惯，便于记忆。实际上，我们所说的裂隙型孔隙体系不是僵化地根据那个级别的裂隙划分基质块，而是指彼此连通的作为自由态煤层气流动通道的裂隙体系。