

—《能源工程技术丛书》—

页岩油气 开发关键技术进展

肖 钢 白玉湖 蔡长宇 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

能源工程技术丛书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

页岩油气开发关键技术进展

肖 钢 白玉湖 蔡长宇 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

页岩油气开发关键技术进展/肖钢,白玉湖,蔡长宇编著. —武汉:
武汉大学出版社,2015.11

能源工程技术丛书

ISBN 978-7-307-16527-4

I. 页岩… II. ①肖… ②白… ③蔡… III. 油页岩—油田开发
IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 196611 号

责任编辑:王亚明

责任校对:杜筱娜

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:17.5 字数:330千字

版次:2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16527-4 定价:110.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

近年来,在国内的非常规油气方面,我们听到最多的是页岩气,讨论最多的也是页岩气。页岩气是指赋存于泥页岩中,在页岩孔隙和天然裂缝中以游离方式存在,在干酪根和黏土颗粒表面以吸附状态存在,甚至在干酪根和沥青质中可能以溶解状态存在的天然气。诚然,随着页岩气勘探开发技术的不断进步,美国在近几年已经成功实现了页岩气商业开发,页岩气所占美国天然气的份额逐年增加。根据美国能源信息署的数据,2007年美国页岩气产量仅366亿立方米;2008年增长到599亿立方米;2009年猛增到1511亿立方米;2010年美国页岩气产量达到1379亿立方米,占全美天然气年总产量的23%,超过我国年天然气产量。2011年和2012年,美国页岩气年产量分别达到1800亿立方米和2937亿立方米。2014年,美国页岩气产量达到3355亿立方米,占美国年天然气产量的40%左右。页岩气的成功开发对美国能源而言堪称一场革命。但正是这场革命使美国天然气价格大幅下降,单一开发页岩气已经没有利润,多数能源公司由页岩气开发转向页岩油开发,并在北美多个页岩盆地发现大量的页岩油甜点区。

所谓页岩油,是指储存于富有机质、纳米级孔径为主页岩地层中的成熟石油。根据美国能源信息署的数据,2012年美国页岩油日产量达72万桶,占其国内石油日产量的12.5%;2013年,美国仅Bakken和Eagle Ford两个页岩油气田的日产油量就达到200万桶。OPEC预计,2018年美国 and 加拿大的页岩油产量将达到490万桶/d。页岩油气储量巨大,是一种重要的非常规资源。在全世界排名前22位的大气田中,美国有6个页岩气田榜上有名,充分证明了页岩气在天然气领域的重要地位。

美国在页岩油气开发方面走在世界前列,已进入页岩油气开发的快速发展阶段,形成了齐全的关键技术系列;加拿大的页岩油气商业开采还处于起步阶段,但由于其地质背景和美国接近,故其技术发展相当迅猛,已经取得了巨大进步;欧洲和南美等的一些国家才刚刚起步,仍处于探索阶段;我国已经开展了一定的理论研究和先导试验,取得了一些成果,但距离全面商业化仍有很长的路要走,目前处于起步阶段。

本书内容共分6章,紧密围绕目前国际上页岩油气开发关键技术的进展而展开。第1章对页岩油气地质勘探技术的进展进行概括介绍,内容包括页岩油气基本地质特征、页岩储层物性的特殊分析技术、页岩油气资源评价体系及方法、页岩油气测井技术、页岩油气储量评价技术、微地震监测技术等。第2章对页岩油气渗流机理的研究进展进行了总结,包括尺度效应对页岩油气渗流扩散机理的影响、多组分等温吸附模型、纳米级尺度对页岩渗透率的影响、页岩油气流动扩散的三重介质理论等。第3章综述了页岩油气产能评价技术,包括页岩油气数值模拟技术、页岩油气产量递减曲线、页岩油气流动阶段的划分、页岩气试井测试技术、页岩油气井产能影响因素等。第4章对页岩油气钻完井压裂关键技术的进展进行了概括,内容涵盖页岩油气钻完井技术进展、页岩井壁失稳机理、水基防塌钻井液研究进展、页岩储层伤害机理研究进展、页岩油气水力压裂技术、页岩油气储层可压裂性评价技术等。第5章介绍了页岩油气地面工程技术进展,包括页岩气地面集输概况、页岩气地面集输管网、页岩气地面集输工艺等。第6章概述了页岩油气返排液处理技术进展,内容包括美国返排液处理现状、返排液无害化处理、高盐度难降解有机废水处理技术、返排液回注的处理技术、达标排放的污水处理技术等。

本书有关彩图及扩展阅读材料可扫描书末二维码获取。

感谢陈晓智、祝彦贺等多位朋友在本书编写过程中给予的帮助。

虽然编著者在页岩油气方面开展了一些研究工作,但随着页岩油气勘探开发实践的不断深入,书中的一些观点或许存在一定的局限性。同时,在本书撰写过程中,限于时间和编著者的能力,书中不当之处在所难免,恳请读者见谅并批评指正。

编著者

2015年7月

目 录

1	页岩油气地质勘探技术进展	1
1.1	页岩油气的基本地质特征	1
1.2	页岩储层的特殊特征与物性分析技术	6
1.3	页岩油气资源评价体系及资源量计算方法	23
1.4	页岩油气地层测井评价技术	37
1.5	页岩油气储量评价技术	55
1.6	微地震监测技术	59
2	页岩油气渗流机理研究进展	73
2.1	尺度效应对页岩油气渗流扩散机理的影响	73
2.2	气体扩散	80
2.3	多组分等温吸附模型	84
2.4	纳米级别尺度对页岩渗透率的影响	86
2.5	页岩油气流动扩散的三重介质理论	88
2.6	三重介质页岩气渗流数学模型	91
2.7	其他渗流机理	93
3	页岩油气产能评价技术研究	94
3.1	页岩油气开发生产的主要特点	94
3.2	页岩油气数值模拟研究	96
3.3	页岩油气产量递减曲线研究	141
3.4	页岩油气流动阶段划分研究	159
3.5	页岩气试井测试研究	180
3.6	页岩油气井产能影响因素	186
4	页岩油气钻完井压裂关键技术进展	189
4.1	页岩油气钻完井技术进展	189
4.2	页岩油气钻完井技术难点和解决钻完井难点的成功案例	195
4.3	页岩井壁失稳机理及特点	199
4.4	水基防塌钻井液的研究进展	200
4.5	页岩储层伤害机理研究进展	204
4.6	页岩油气水力压裂技术	207

2 | 页岩油气开发关键技术进展

4.7	页岩油气水平井大型压裂设备	215
4.8	页岩油气储层可压裂性评价技术	217
4.9	页岩油气井压裂优化设计进展	222
5	页岩油气地面工程技术	224
5.1	页岩气地面集输概况	224
5.2	页岩气地面集输管网	225
5.3	页岩气地面集输工艺	226
6	页岩油气返排液处理技术进展	241
6.1	返排液的特点	241
6.2	美国返排液处理现状	243
6.3	返排液无害化处理	247
6.4	高盐度难降解有机废水处理现状	247
6.5	返排液回注处理技术	251
6.6	达标排放的污水处理技术	252
6.7	对返排液处理的基本认识	254
6.8	返排液处理中存在的问题及发展方向	255
	参考文献	257

1 页岩油气地质勘探技术进展

1.1 页岩油气的基本地质特征

页岩气是指赋存于泥页岩中,在页岩孔隙和天然裂缝中以游离状态存在,在干酪根和黏土颗粒表面以吸附状态存在,在干酪根和沥青质中甚至可能以溶解状态存在的天然气。页岩油是指储存于富有机质、以纳米级孔径为主页岩地层中的成熟石油(邹才能等,2013)。页岩中存储的究竟是页岩气还是页岩油,或者两者共存,与页岩所处的地质环境息息相关。

据2010年达拉斯地质学会(Dallas Geological Society)统计,在北美地区,页岩气产区有19个,页岩油气产区有13个,生物页岩气产区有4个,低成熟度页岩气产区有2个,页岩气潜在产区有5个,页岩油潜在产区有10个,整体可勘探开发的地区达53个,具有极大的页岩油气开发潜力。其广泛分布的发育盆地,使北美地区成为页岩油气最大的生产地区,见图1-1(Dallas Geological Society, Jarvie等,2010)。

页岩油气是主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩及页岩层系中,以吸附或游离状态为主要存在方式的聚集油气,因页岩的成熟度不同而产出油或气,或者油热解、裂解而形成天然气。从赋存状态来看,页岩气介于煤层吸附气(吸附气含量在85%以上)和常规圈闭气(吸附气含量通常为0,可以忽略)之间。页岩油气是一种区域性连续聚集型非常规油气藏。页岩油气系统为自生自储的含油气系统,常常发育于盆地的斜坡、中心处,页岩油气储层内常常发育有纳米级的孔隙和微裂缝。国外学者认为可以将页岩油气归入致密油气范畴内。结合国内外的主要文献,页岩油气的特性可以归纳为如下4个:生产的唯一性、储集多样性、富集的变化性和产出的改造性。

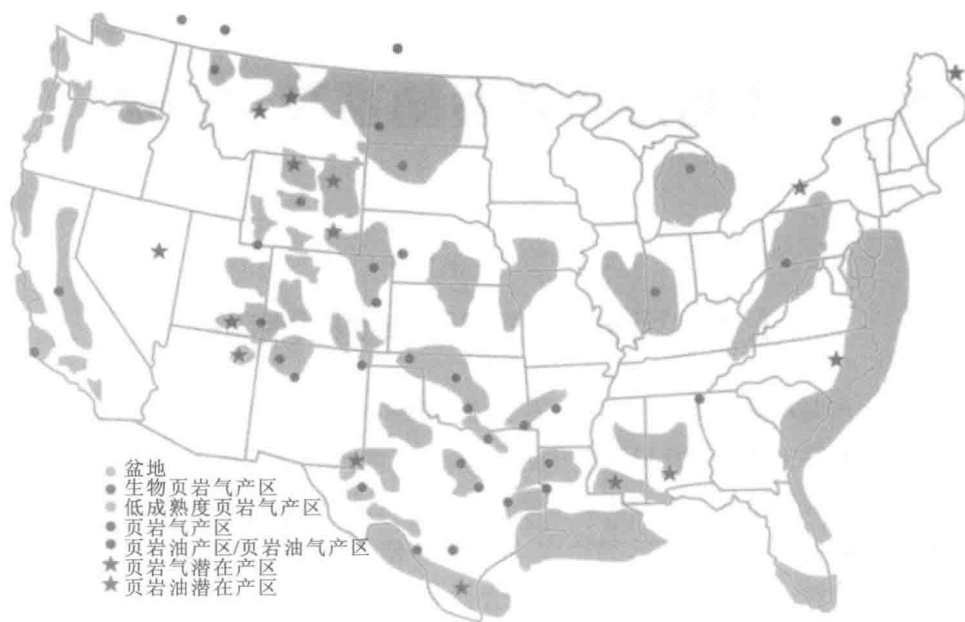


图 1-1 北美地区页岩油气产区及潜在产区分布图

1.1.1 生产的唯一性

页岩中有机质演化生成的油气是页岩油气的唯一来源。

页岩气按其天然气成因主要可分为两种类型：热成因型和生物成因型。此外，还包括混合上述两种类型的混合成因型。热成因型页岩气可进一步分为 3 个亚类：

① 高热成熟型，即干酪根、沥青裂解形成的页岩气，如美国 Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩气藏。

② 低热成熟型，即由于酪根降解作用形成的页岩气，如 Illinois 盆地的 New Albany 页岩气藏。

③ 混合岩性型，即大套页岩与砂岩、粉砂岩夹层共同储气。

页岩油尚无具体的详细分类。

尽管页岩连片分布，但其热成熟度、有机质丰度等非均质性极强。美国的页岩油气生产经验表明：连片地毯式工厂化的钻井才能获得经济效益。页岩气生产井生产周期长，据有关学者推测，一般为 20~30 年，最长达 50 年（如

Barnett页岩气藏);页岩油的生产周期尚无定论,一些专家认为在10~15年左右,一些人则认为生产年限可以达到30年甚至更长。这是有机质演化生成的油气储集在页岩中持续供应的结果。不同演化阶段的有机质生成油气的速度是有差异的,生成页岩油、页岩气高峰的 R_o 值不同,生成页岩油、页岩气极限的 R_o 值也不同。这就造成页岩油气区为星罗棋布的甜点区,这种差异性为寻找页岩油气富集区提供了一个新思路。

因此,任何沉积盆地中只要有富有机质页岩存在,就可能形成页岩油气或者页岩气的富集;任何发现了大量常规油气藏的含油气盆地,若烃源岩为富有机质页岩,则几乎一定会有页岩油气存在,并可扩大盆地范围内的油气勘探领域。

1.1.2 储集的多样性

页岩油气形成后无运移或运移距离极短,理论上应与富有机质页岩一样连续大面积分布。美国Fort Worth盆地面积为 38100km^2 ,烃源岩面积为 26000km^2 ,Barnett页岩气核心开发面积为 15500km^2 ,占盆地面积的41%。其开采呈地毯式布井与钻井、工厂式生产模式。这体现出了储集的第一个特点:连续分布,面积广阔。

烃源岩(页岩)生成的烃类只有部分能被排出,厚度上只有靠近疏导层、储层十几米范围内才有烃类排出,即烃源岩内部上下20~30m的范围。大量烃类滞留于烃源岩中,估计只有不到1%~10%的烃类可以被排出。此为储集的特点二:资源量大。

烃源岩中的残留烃根据成熟度的不同,有的生成油,有的生成湿气,有的生成干气。大量的页岩油气在烃源岩中以吸附态、游离态(吸附气和游离气含量变化大,吸附气含量一般为20%~80%,而页岩油尚无定论)和少量的溶解态存在于纳米级孔隙、裂缝内(图1-2)。此为储集的特点三。有机质的存在导致碳氢化合物以吸附的形式存在于孔隙性有机物的表面活性区域;干酪根也为页岩基质创造了混合润湿性环境,使干酪根附近的页岩呈现油湿特征,而远离干酪根的区域则呈现水湿特征。这种纳米级孔缝(页岩孔喉直径上限为小于1nm至几十纳米)遵从非达西渗流定律,使得页岩油气的富集以生烃膨胀作用为基本动力,油气呈现活塞式排出的“逃逸”过程。

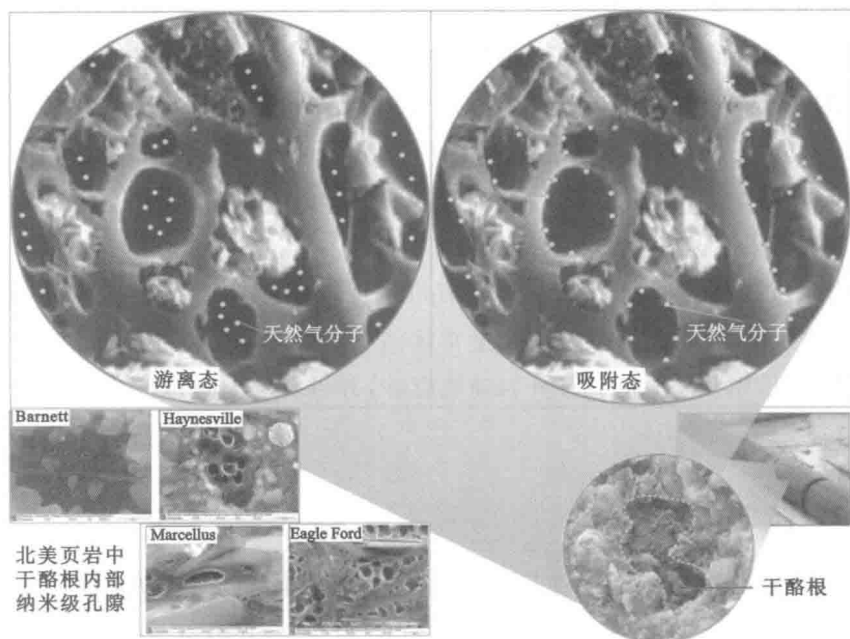


图 1-2 页岩气赋存状态:游离态+吸附态

1.1.3 富集的变化性

页岩油气富集条件复杂多变,从不同角度有不同的认识。任何一个盆地和地区的页岩气形成条件均有差异。Michael D. Burnaman 等(2009)的研究表明,目前国外页岩气勘探开发选区筛选标准可达 16 条,包括:可用页岩厚度、有机质丰度及垂向聚集度、热成熟度、天然气地质储量及储备、脆性及地质时代、孔隙度及垂向聚集度、页岩岩石组分、3D 地震可行性、构造背景、页岩横向连续性、渗透率、压力梯度、水资源可利用性及物流、现有输气基础设施、井场通道、产水处理等。纷繁复杂的多条件限制使页岩气开发具有极大的难度和风险性。尽管上述评价标准从理论上看是很合理的,但对于一个新的区域,在掌握的资料不是很充分的条件下是难以应用的。比如,对于我国的主要页岩发育区带,就需要使用一个快速简单的评价方法进行页岩气资源评价,寻找主要的页岩气聚集带。陈桂华等(2012)提出了页岩气“五度”快速评价法,“五度”即埋藏深度、页岩厚度、有机质丰度、有机质热演化程度和页岩的脆性度。利用“五度”快速评价法能够较好地快速确定有利区。① 页岩具有较好的含气性:页岩应该有一定的埋藏深度,以利于其成熟,并要求有一定的保存条件,盆地中心区或构造斜坡区为有利区,深度范围为 1000~4000m;② 富有机质页岩厚度达一定规模:

区域上连续稳定分布,有效厚度大于 15m,TOC 值低的页岩厚度大于 30m;
 ③ 有机质含量达到一定指标:有机质丰度具有最低门槛值,对于美国来说,TOC 值一般大于 2%,也有极少部分小于 2%,但是最好在 2.5%~3.0%以上;
 ④ 有机质热成熟度在生气窗范围之内:有机质热演化程度 R_o 值大于 1.1%,美国页岩气 R_o 值通常为 1.1%~3.5%,对于页岩油, R_o 值可以小于 1.1%;
 ⑤ 脆性矿物、微裂缝发育,利于后期压裂改造:页岩有一定脆性度,石英、方解石、长石等含量大于 30%~40%。

以上五个条件描述了什么样的页岩可以产生页岩气或者页岩油,但是我们仍然关心页岩气的含气量变化及含气量的计算等。前面已经叙述过,页岩气主要包括游离气和吸附气,它们赋存在纳米级的孔隙和裂缝中。这些微孔隙、微裂缝大部分发育在有机质和矿物内,因此含气量与内部条件的 TOC 值、 R_o 值、伊利石含量和厚度、面积成正相关,外部条件中的压力、温度、含水量、构造裂缝对含气量亦有影响。压力增高,无论以何种赋存方式存在的气体,含量都呈增大趋势。温度升高,气体的运动速度加快,会降低吸附态天然气的含量,同时吸附是放热过程,温度升高会抑制该过程的发生,从而使游离态页岩气含量增大。因为水比气的吸附性能好,所以含水量大会使水占据部分活性表面,导致甲烷吸附容量降低。对于浅层的生物成因页岩气,地层水矿化度会影响吸附气含量:矿化度高,离子键使水的吸附能力增强,容易占据活性表面,进而降低页岩气吸附气含量。而富余的孔隙空间可以增加游离气的存储,构造裂缝的长度、密度与游离气、吸附气含量呈正相关。所以,页岩气的含气量是诸多因素共同作用的结果,其作用过程纷繁复杂(图 1-2,图 1-3)。

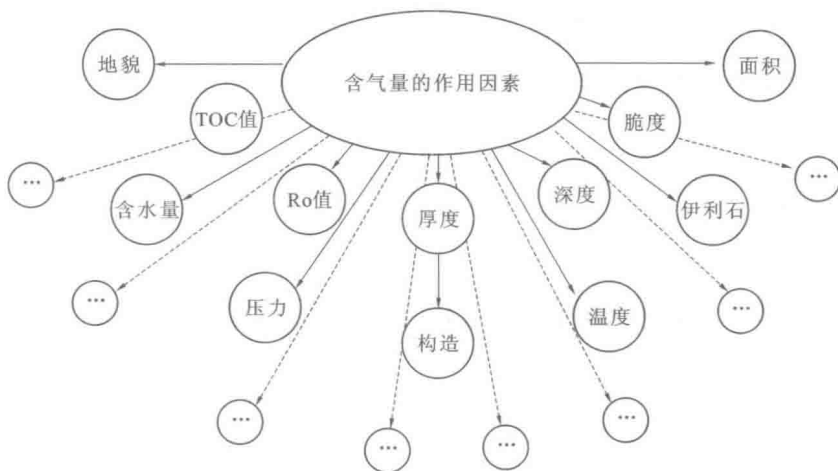


图 1-3 页岩气含气量的作用因素

美国页岩油气产区一般分布在盆地斜坡或中心区,呈大范围“连续”分布,局部富集,构造改造少,地貌较为平缓。而我国南方上扬子等地区地貌复杂,盆地、盆地斜坡、高陡带、高原带都存在,如此复杂的地貌条件给我们寻找页岩气带来了极大的挑战。

1.1.4 产出的改造性

含有非固结砂岩的常规天然气储层的基质渗透率为 $100\sim 5000\text{mD}$;产气致密砂岩层的基质渗透率达 $0.05\sim 0.1\text{mD}$;而深层产油气页岩的基质渗透率达 $0.0001\sim 0.0005\text{mD}$,油气流动表现出非达西流特征。如此低的渗透率使页岩油气单井产量低,初期递减快,生产周期长。据统计,美国 40% 的页岩油气井初期裸眼测试无天然气流;55% 的页岩油气井初始无阻流量没有工业价值;5% 的页岩油气井初期具有工业气流。如何将页岩气或者页岩油采出,这个难题在 2003 年 Barnett 页岩开发技术(水平井多级压裂)获得重大突破后得到了解决,从而使美国致密气、页岩气产量达到一个新的高度:2010 年,致密气、页岩气两种非常规天然气产量合计达到 $3.134\times 10^{11}\text{m}^3$,占美国天然气产量的 54%。技术革新的成果显而易见:对直井进行压裂改造后,其平均日产量达 8063m^3 ;对水平井进行分级压裂改造后,其平均日产量超过 $1\times 10^5\text{m}^3$ 。加之密集的布井、钻井,使页岩气开发处于蓬勃发展期。美国页岩油单井产量突破了每天几百桶,甚至高达上千桶,水平井和多级水力压裂的效果显而易见。

页岩的供油气能力主要取决于五项储层参数,即渗透率、厚度、储层压力、流体黏度和泄流半径。页岩油气井初始产量低,所有井都需实施压裂改造,即提高页岩的渗透率。要提高页岩的渗透率,页岩必须具有易改造性,而页岩的敏感性、脆性矿物含量、变质程度甚至岩层组合都会影响页岩的被改造能力。

简而言之,页岩油气的工业生产必须建立在对页岩储层进行大规模、深度改造的基础上。

1.2 页岩储层的特殊特征与物性分析技术

1.2.1 页岩储层的特殊特征

① 页岩作为储层,其特征介于煤层与致密砂岩之间。其含有有机碳,但有机碳含量不如煤层高,故其也含有吸附气,但吸附能力低于煤层。页岩中也含

有一定的自由气,但自由气含量不如致密砂岩高。图 1-4、图 1-5 中给出了页岩中有机质含量、气体赋存状态与煤层、致密砂岩的对比。

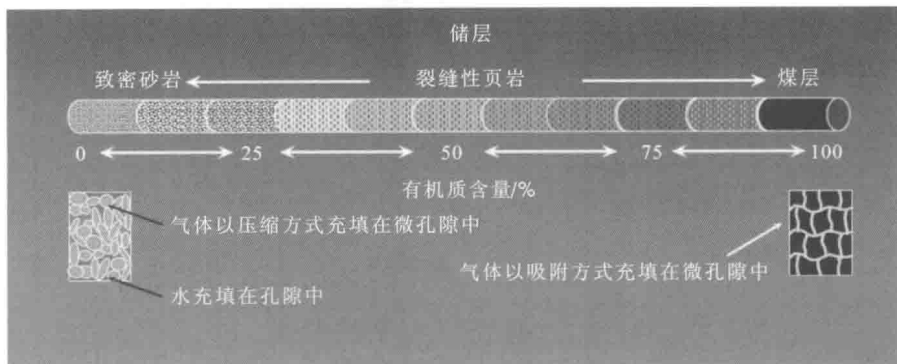


图 1-4 页岩中的有机碳含量

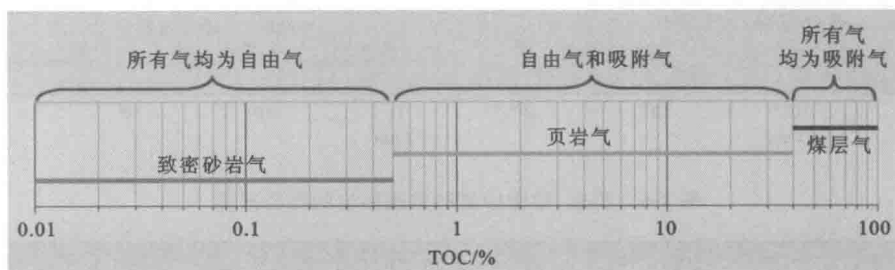


图 1-5 气体赋存状态

② 与砂岩储层相比,页岩具有多重孔隙结构,结构复杂。微观孔隙发育是其显著特征,其基质孔径多是纳米级尺度。表 1-1 中给出了页岩孔隙结构的类型(陈一鸣等,2012)。图 1-6 所示为页岩孔径尺度分布情况及与致密砂岩、常规砂岩的对比。图 1-7 给出了砂岩与页岩的孔隙结构对比。

表 1-1 页岩孔隙结构的类型与特征

孔隙类型	特征
粒间孔	颗粒之间的孔隙,一般为微米至纳米级
矿物质孔	矿物质间或晶间的孔隙,一般为纳米级
有机质孔	有机质内部的孔隙,一般为纳米级
化石孔	化石体腔孔、骨架孔等,一般为毫米级
微孔隙	基质中的微小孔道,一般为毫米级

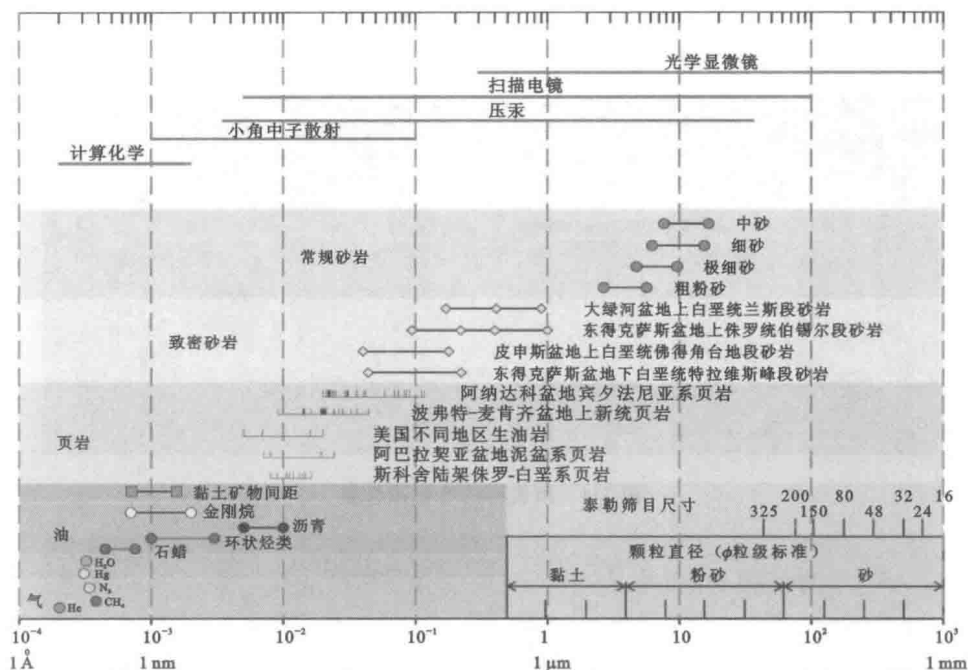


图 1-6 页岩、致密砂岩和常规砂岩的孔径尺度

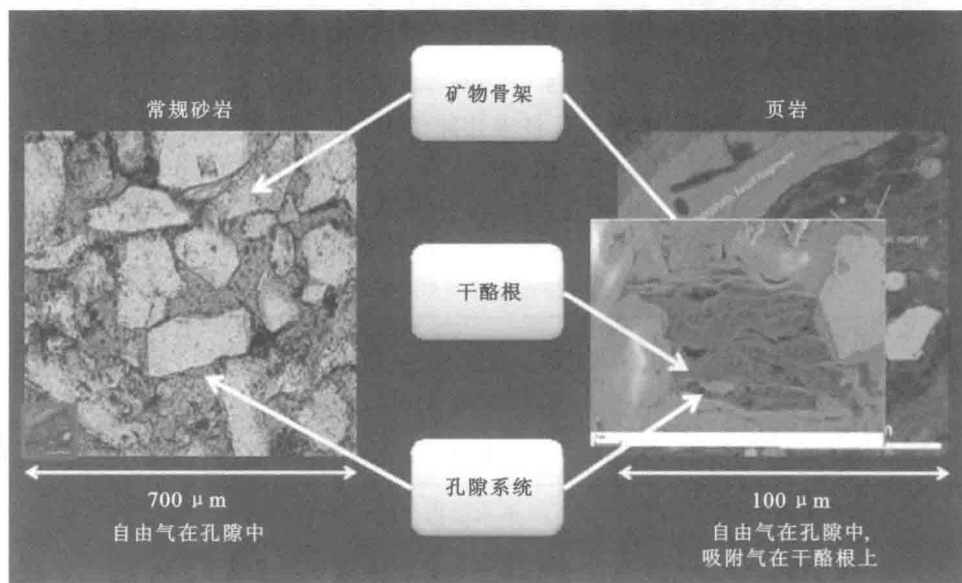


图 1-7 砂岩与页岩的孔隙结构对比

③ 页岩尽管也常常发育微裂缝,但与煤相比,其缺乏密集的割理系统。图 1-8、图 1-9 所示为煤岩和页岩的电镜扫描图。

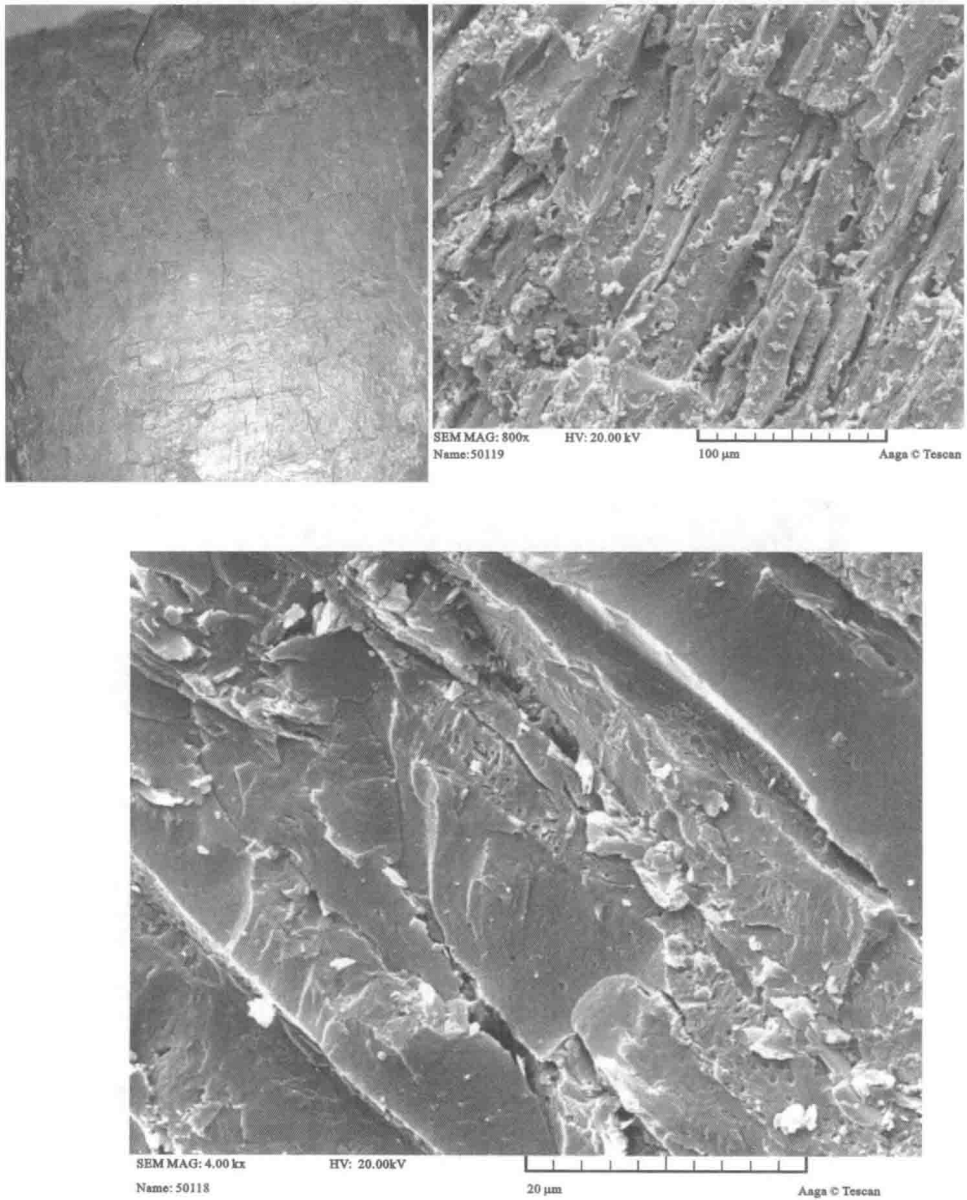


图 1-8 煤岩的电镜扫描图

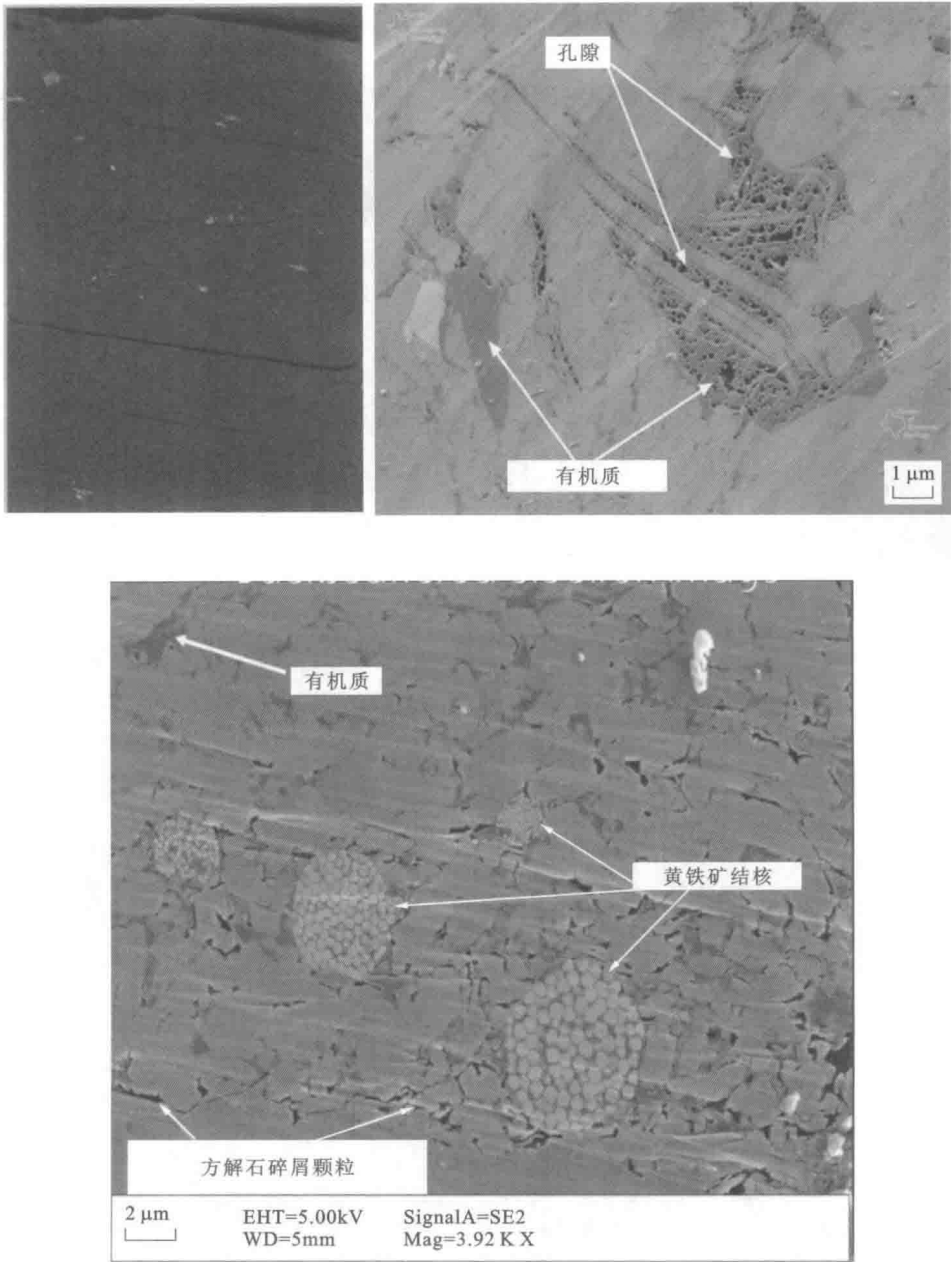


图 1-9 页岩的电镜扫描图