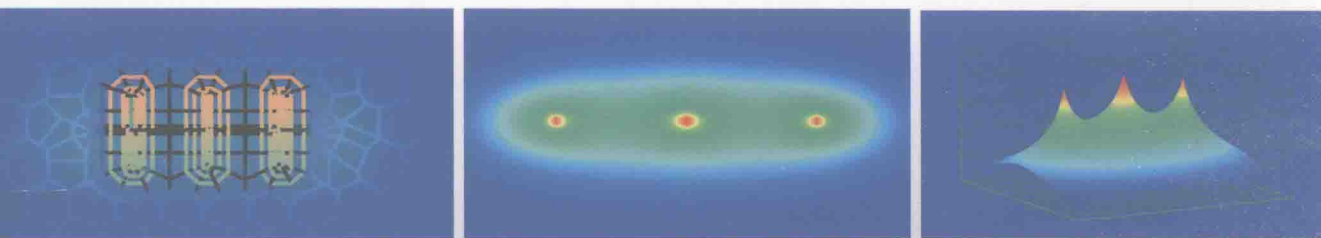


非常规油气流动机理 研究与应用

RESEARCH AND APPLICATION OF
UNCONVENTIONAL OIL AND GAS FLOW MECHANISM

李道伦 查文舒 王磊 © 著



石油工业出版社

非常规油气流动机理 研究与应用

李道伦 查文舒 王 磊 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了页岩气流动机理、启动压力梯度、水平井大规模体积压裂效果评价等内容；详细介绍了页岩气滑移速度模型、视渗透率模型、PEBI 网格下的页岩气流动数值模拟方法、页岩气组分流动模型、井口产出气组分比例变化特点及组分试井理论与方法；介绍了作者在启动压力梯度方面的最新研究进展，以及现有求解方法的缺陷；介绍了水平井多段压裂的返排数据解释方法、生产数据解释方法、压力恢复数据解释方法、压裂效果动态评价方法及相关油田案例分析；最后介绍了解析方法下的生产数据分析方法。

本书既有基础理论，又有宏观流动模型，还有多段压裂水平井、启动压力梯度的现场案例，集基础理论、数学模型、应用研究于一体，可供非常规油气开发领域的工程技术人员及研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

非常规油气流动机理研究与应用 / 李道伦, 查文舒, 王磊著.

—北京: 石油工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5183-2077-6

I. ①非… II. ①李… ②查… ③王… III. ①油页岩—油气钻井—非定常流动—研究 IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 (214288) 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523693

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京市密东科技有限公司

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 17.25

字数: 445 千字

定价: 129.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

美国的页岩气革命改变了世界能源格局,深刻影响着油气领域研究内容。大量研究围绕页岩气开发机理、方法、工艺和设备等迅速展开,页岩气流动机理是研究热点之一。页岩气流动机理十分复杂,是一个集多尺度、多机理、多场耦合等于一体的非线性问题。页岩储层含有纳米级的微孔隙、微米级的大孔隙及天然裂缝,以及更大尺度的人工裂缝等,从而导致多种流动机理。页岩气存在多种赋存形式,如自由气、吸附气、少量的溶解气。压裂液注入引发地应力场、温度场、化学场等剧烈变化,在人工裂缝、天然裂缝及基岩间存在流固等多场耦合效应。

致密气与页岩气流动机理研究有很多挑战。首先,页岩气的流动模型存在不一致性。虽然大家公认页岩气流动包含连续流、滑移流、过渡流与自由分子流等,但最终推导的视渗透率模型在过渡流与自由分子流阶段仍有很大的差异。其次,开发中的现象还难以定量解释。致密储层的返排规律不同于常规油气藏,相同的返排制度可能导致两种截然不同的开发结果。另外,由于页岩的致密性和现有设备的局限性,其孔径分布规律研究只能通过直观与非直观、多尺度与多精度的测量结果进行融合,仍难以窥视其全貌。

本书是著者近5年来在非常规油气(致密气、致密油、页岩气)研究成果的基础上编著而成的,共9章。第1章概述非常规油气的研究进展。第2章为页岩气流动机理及流动模型,包括基于分子动力学模拟的视渗透率研究、可描述页岩气组分比例变化的组分模型、含拟启动压力梯度的渗流方程等。第3章为PEBI网格划分及单相流方程的数值求解。第4章为致密油气与页岩气的数值模拟研究,包括多段压裂水平井的试井解释方法、生产数据分析方法、基于返排数据的压裂效果评价方法等。第5、6两章为页岩气组分流动模型及基于组分比例的地层参数评价方法,包括组分方程数值求解方法、页岩气组分比例变化规律、基于组分比例的页岩地层参数反演方法等。第7章为启动压力梯度对流动规律的影响研究。低渗透井瞬态压力响应的普遍特点是,关井所测的压力及其导数在后期呈平行上翘趋势。然而,数值方法求解含启动压力梯度的渗流方程时,绝对启动压力梯度不能使压力导数上翘,进而发现拟启动压力梯度才是压

力导数上翘的原因。第8章为双孔双渗模型下的页岩气流动规律研究，第9章为基于解析解的生产数据分析方法。查文舒与李道伦编写了第1章，查文舒编写了第2章2.2~2.4节、第3章和第4章部分内容，王磊编写了第9章，其余章节由李道伦编写。本书还凝聚了实验室多位老师的集体智慧，也包含着众多研究生与博士生的科研成果，尤其是张龙军博士在页岩气组分模型方面的研究成果、李清宇在解析解的生产数据分析方面的成果。

本书受到中国石油与中国科学院战略合作项目资助（资助号：2015A-4812）。本书也与“十一五”与“十二五”国家重大科技专项、973项目、国家自然科学基金、科学院知识创新项目、大庆油田等项目的先前培育密切相关（资助号：2008ZX05001-001，2011ZX05009-006，2011CB707305，2006CB705805，10702069，10932010，XDB10030402）。国家自然科学基金与973项目提供了微观流动机理研究支持，科学院页岩气先导专项、国家重大科技专项提供了黑油模型、化学驱模型、组分模型及其模拟器开发方面的研究支持。大庆油田的项目，尤其是与大庆油田测试技术服务分公司的合作，为作者提供了宝贵的接地气的机会，使得所研发的软件能为大庆油田的油气开发服务。在此，作者深表感谢。

本书的形成要特别感谢我的博士生导师孔祥言教授与卢德唐教授。从基础数学专业到本书的形成所经历的种种转变都与他们的指导、帮助密不可分。在初涉渗流力学领域茫然时，孔祥言教授对我的很多疑问如渗透率的极限等都给予详尽解答，现在回想仍历历在目。

由于页岩气及致密油气的研究方兴未艾、作者水平与时间有限，本书还存在许多缺点与不足，恳请批评指正。

著者

2017年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 非常规油气概述	1
1.2 非常规储层的孔径分布	4
1.3 非常规油气的流动机理	9
1.4 页岩气吸附机理	12
1.5 压敏效应	13
1.6 数值模拟研究进展	16
1.7 裂缝性储层数值模拟研究进展	17
参考文献	18
2 基本渗流方程	27
2.1 流动机理概述	28
2.2 滑移速度	33
2.3 速度模型及视渗透率	39
2.4 无克努森数下的视渗透率模型	46
2.5 储存机理	52
2.6 达西定律	54
2.7 连续性方程	56
2.8 不考虑组分的流动方程	58
2.9 考虑组分的流动方程	60
2.10 含启动压力梯度的渗流方程	64
2.11 多重介质油藏基本方程	67
2.12 定解条件	69
参考文献	70
3 网格划分及单相方程的数值解法	75
3.1 PEBI 网格划分	75
3.2 单相油流动方程离散与线性化	78
3.3 传导率空间加权	85
3.4 单相可压缩流体流动的线性化	87

3.5	初始条件与边界条件	89
	参考文献	91
4	致密油气压力及生产数据分析	92
4.1	基于数值模拟的页岩气流动规律研究	93
4.2	单孔单渗模型下的页岩气井瞬态压力响应特征	99
4.3	基于返排数据的压裂效果评价	108
4.4	基于生产数据的压裂效果评价实例	113
4.5	压裂效果动态评价方法	117
4.6	致密油多段压裂水平井压力恢复数据解释	120
4.7	理想情形下的敏感性分析	122
4.8	基于实际裂缝间距的敏感性分析	125
4.9	基于实际解释参数的敏感性分析	132
	参考文献	147
5	组分方程数值求解	150
5.1	积分形式的油气两相组分方程	150
5.2	离散方程	152
5.3	方程线性化	153
5.4	单相气的组分方程离散	156
5.5	单相气的组分方程线性化	158
5.6	程序正确性验证	159
5.7	多组分吸附对井底压力的影响	161
5.8	拟多组分吸附与多组分吸附对比	164
	参考文献	166
6	基于组分比例的生产数据分析方法	168
6.1	概述	168
6.2	基于物质平衡时间的生产数据分析方法的缺点	170
6.3	生产井组分比例 CC 区	171
6.4	组分比例变化机理分析	173
6.5	瞬态井口组分比例与瞬态井底压力特征比较	177
6.6	井口组分试井曲线敏感性分析	186
6.7	拟多组分渗透率与多组分渗透率对组分比例的影响	192
6.8	页岩气井组分比例变化规律研究	199
	参考文献	202

7 启动压力梯度对渗流规律影响研究 205

7.1 含绝对启动压力梯度的单相油流动方程数值求解 206

7.2 基于叠加原理的含启动压力梯度方程求解 208

7.3 叠加原理不能求解含绝对启动压力梯度的渗流方程 209

7.4 拟启动压力梯度渗流方程的数值求解 220

7.5 低渗透井压力数据的案例分析与拟合方法 223

7.6 拟启动压力梯度的敏感性分析 226

参考文献..... 229

8 页岩气双孔双渗模型流动特征 232

8.1 单相双孔双渗模型数值解 232

8.2 窜流能力与解吸附 232

8.3 吸附与解吸附滞后现象 233

8.4 正确性验证 234

8.5 双孔双渗单井模型下的页岩气流动规律研究 235

8.6 井—基岩流动对井底压力的影响 248

参考文献..... 250

9 基于解析解的生产数据分析方法 252

9.1 生产数据分析方法简介 252

9.2 传统生产数据分析方法 253

9.3 致密气生产数据分析方法 259

9.4 页岩气生产数据分析 262

参考文献..... 267

1 绪 论

1.1 非常规油气概述

很早,人类就发现了石油和天然气。沈括在延州发现石油时就预料到“此物后必大行于世”,今天的“石油”二字也是他创始使用的,最早见于《延州》诗:二郎山下雪纷纷,旋卓穹庐学塞人。化尽素衣冬不老,石油多似洛阳尘。1859 年美国在宾夕法尼亚完钻的第一口油井标志着石油进入商业性开发。

20 世纪以来,油气的勘探开发从浅层走向深层,从陆地走向海洋,油气已成为主要能源和化工原料,开采的主要对象为常规油气资源。

玉门油田诞生了新中国第一口油井,克拉玛依等油田相继开发。1960 年 3 月,大庆石油会战在“宁肯少活二十年,拼命也要拿下大油田”的豪迈誓言中取得了胜利。1963 年周恩来总理庄严宣布,中国需要的石油现在已经可以自给自足,中国人民使用“洋油”的时代即将一去不复返了。但是随着油气需求的快速增加,我国由油气出口国变为油气进口国,对外依存度已超过 60%。

随着常规油气资源的逐渐减少,人们逐渐重视非常规油气开发。常规油气与非常规油气资源总量的比例约为 2:8。目前常规油气资源采出程度约为 25%,非常规油气资源采出程度还微不足道(邹才能等,2014)。但近年来,非常规天然气产量快速上升,已占到天然气产量的 18%(EIA,2013a;邹才能等,2010)。

非常规油气是指用传统技术无法获得工业产量、需改善流动能力才能经济开采的油气资源。非常规油气储层的特点为:(1)孔隙度小于 10%;(2)孔喉直径小于 $1\mu\text{m}$ 或渗透率小于 1mD 。相对于常规油气,非常规油气面积大且连续分布,圈闭界限不明显,表现为源储共生,其主要类型有致密油、致密气、页岩油、页岩气、煤层气、重油沥青、天然气水合物等(邹才能等,2013,2014)。

近 10 年是美国页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”。2012 年美国页岩气产量约占美国天然气总产量的 40%;致密油约占美国石油总产量的 22%。2014 年页岩气产量约占美国天然气总产量的 50%,致密油产量约占美国石油总产量的 36.2%(EIA,2015;邹才能等,2015)。页岩气、致密油等非常规油气快速发展,使得美国油气对外依存度大幅下降,石油对外依存度已降至 39.1%。据英国石油公司发布的 2014 年世界能源统计,2014 年度美国的天

然气产量大幅增加,其中的非常规天然气产量远超常规天然气产量,实现了从天然气进口国向出口国的转变(陈勉等,2015)。

美国和加拿大的“非常规油气革命”引发的石油工业科技革命,正推动世界油气资源从常规油气向非常规油气跨越。预计世界非常规油气产量占总产量的比例将由目前的 10% 升至 2030 年的 20% 以上。美国的页岩气、致密油开发改变了世界能源格局,也深刻影响了世界的政治、经济关系。

近年来,我国在致密气、致密油的勘探与开发方面也取得了很大的进展。2012 年致密气产量约占全国天然气总产量的 28%;发现了目前全国最大的苏里格致密气区。致密油在鄂尔多斯、准噶尔、松辽、渤海湾、四川等盆地都有重大发现(邹才能等,2015)。页岩气在四川盆地南部海相页岩中获工业气流,工业化试验区建设也取得重大进展(滕吉文等,2013;康玉柱等,2012)。

然而,我国在非常规油气开发技术方面与国外还有很大的差距,软硬件方面更多依赖进口。当前,我国仍需要“大庆会战精神”,成功开发非常规油气,尤其是页岩气。

油页岩为颗粒非常细的沉积岩,蕴藏大量未成熟的干酪根,也是未成熟的烃源岩。由于生烃量有限,通常油页岩含油率低,其开发利用需要通过人工加热,使干酪根转变成为油气(童晓光,2012)。油页岩的开采成本高,技术难度大,大多数油页岩矿目前还没有达到商业化开发的程度。高质量的油页岩主要集中在美国、俄罗斯等 14 个国家(童晓光等,2014)。油页岩的资源潜力巨大,是未来石油重要的接替资源。

烃源岩自身的有机质含量及其热演化程度是油气藏丰度的主要控制因素。烃源岩受热成熟度控制,如果处于生油窗阶段,生成的是油;如果处于生气窗阶段,生成的就是气。生成的油气排出,运移至常规储层就成为常规油气,运移到致密储层就成为致密油气,留在原位就成为页岩油。因而,致密油气则是在烃源岩以外的致密储层中形成的,是经过初次运移和短距离二次运移后形成的油气。页岩气则是烃源岩演化至高一过成熟阶段的产物,是以游离气和吸附气为主的天然气类型(宋岩等,2013)。

由于非常规油气主要特征表现为源储共生、大面积分布、储量丰度低、流动能力差,目前主要采用水平井大规模压裂技术、平台式、工厂化生产等方式开采。

1.1.1 致密气

1927 年发现的美国圣胡安盆地致密气田、1976 年发现的加拿大埃尔姆沃斯致密气田,是最早进行工业化开采的非常规天然气资源。20 世纪 60 年代末至 70 年代初,致密天然气已被国外认为是天然气的第二个主要来源。2014 年致密气产量约占美国天然气总产量的 19.2% (邹才能等,2015)。

致密气是指覆压基质渗透率小于 0.1mD 的天然气。致密气是从烃源岩中运移出来聚集在相邻的地层中,油气运移以一次运移或短距离二次运移为主(童晓光等,2014)。致密气的许多特征介于常规气和页岩气之间,孔隙度介于 7%~15%,气储存于孔隙中。致密气的开采方式与页岩气基本相同,也以水平井为主,并要进行水力压裂。目前,美国的致密气产量与页岩气基本相当。我国当前的非常规气以致密气为主体。

1.1.2 页岩气

页岩是一种沉积岩,主要是由黏土沉积而形成的岩石,其中混杂着石英、长石的碎屑以及其他化学物质。页岩常含 30%~50% 的黏土矿物、15%~25% 的粉砂质和 1%~20% 的有机质(王晓琦等,2015)。美国的 Barnett 页岩硅含量较多,占体积的 35%~50%,黏土矿物含量较少(<35%)。页岩气主要产自富有机质黑色页岩,主要以吸附气或游离气形式存在。页岩气的组成以甲烷为主,含有少量的乙烷、丙烷、 N_2 、 CO_2 等,极少含有 H_2S 气体。

通常页岩储层富含有机质、岩层厚度大且分布范围广、孔隙发育好,因此页岩气的储量潜力大。由于页岩气的分布不受圈闭的控制,主要受烃源岩分布的影响,因此容易形成大面积连续分布(童晓光等,2014)。

页岩富含有机质。大部分页岩气为热成因,也有部分页岩气为生物成因。天然气在成熟时一部分运移到相邻的储层中,剩余部分滞留在页岩中。

全球最早发现页岩气并成功商业化开发的国家是美国和加拿大。1821 年,在美国东部第一口页岩气井钻探成功。经过长期不断的技术攻关与创新,美国和加拿大成功实现了页岩气的商业化开采,全球页岩气的研究进入了高潮,掀起了一场页岩气革命。

根据美国能源情报署(EIA)的统计,美国页岩气的产量占天然气总产量的比重从 2007 年的 8.07% 上升为 2011 年的 29.85%,2012 上升到 40%,2014 年更是达到 50%(EIA, 2015)。而此前美国能源情报署宣称到 2035 年页岩气产量将占到美国天然气总产量的 45%(Rahm 等,2011)。可见,美国这几年的页岩气产量得到了快速的提升,并且提升速度远远大于预期。

2013 年美国 EIA 统计,页岩气资源占前五的国家分别为中国、阿根廷、阿尔及利亚、美国、加拿大。我国页岩气资源位居首位,但我国页岩气的开发还处于初级探索阶段,开采量不足天然气总产量的 1%。如何高效开发页岩气,实现我国能源结构升级,是迫切需要解决的问题。

2012 年 3 月,中国国土资源部公布了全国页岩气评估报告。经过初步估计,我国可开采页岩气储量为 $25 \times 10^{12} m^3$ (不包括青藏区)。目前,我国对页岩气的开发已取得一定的进展。

2012 年 11 月,中国石化在涪陵焦石坝地区成功获得高产工业气流,实现了海相页岩气勘探的重大突破(周德华,2014)。据中国石油经济技术研究院发布的报告,我国页岩气开发在 2013 年取得了重大突破,迄今已完成钻井约 150 口,页岩气产量接近 $2 \times 10^8 m^3$ (中国石油经济技术研究院,2014)。2014 年,中国石化在涪陵焦石坝地区建成了我国首个大型页岩气田,初步实现了页岩气的商业化开发。2015 年底,中国石化在涪陵页岩气田完成一期 $50 \times 10^8 m^3/a$ 产能建设目标。截至 2015 年 9 月,中国石油在长宁—威远、昭通国家级页岩气示范区共完钻 108 口气井,其中 41 口井进行了试采,取得了页岩气勘探开发的重要阶段成果(陈勉等,2015)。据统计,至 2015 年 6 月,我国陆上已完钻 460 余口井,获气井 280 口,累计产气 $22.6 \times 10^8 m^3$,2014 年产气 $12.47 \times 10^8 m^3$ (王晓琦等,2015)。

中美两国的页岩在储层特征上存在较大差异(表 1.1),美国页岩气的开发方法不能直接应用于我国页岩气勘探和开发。

表 1.1 中美两国的页岩在储层差异(据陈勉等,2015)

特征参数	中 国	美 国
埋深	以 >3500m 为主	以 1500~3500m 为主
构造	复杂,多次改造,断裂发育	简单,一次抬升,断裂较少
沉积类型	发育 3 大类,海相有效范围保存少	单一,主要为海相页岩
有机碳含量	中等—好,以 1%~5% 为主	丰富,以 5%~10% 为主
含气量	偏低(平均 1~3m ³ /t)	高(平均 3~6m ³ /t)
热演化程度 R_o	变化大,海相偏高($R_o > 2.0\%$), 陆相偏低($R_o < 1.3\%$)	适中(R_o 为 1.1%~2.0%), 普遍为成气高峰阶段

页岩气井的产量变化较大,第一年的生产即可呈断崖式下降,递减率高达 70%~80%,之后趋于稳定;最终采收率较低,采收率一般在 10%~30% 间(邹才能等,2015)。

1.1.3 致密油

我国致密油勘探起步较晚,之前比较通用的术语为低渗透油藏。自 2010 年以来,致密油这一术语才得到广泛接受和采用(邹才能等,2010)。赵政璋等(2012)认为,致密油是指夹在或紧邻优质生油层系的致密碎屑岩或者碳酸盐岩储层中,未经过大规模长距离运移而形成的油气聚集。因而,一类致密油储层是未经过输运形成的致密油层,另一类是经过短距离输运而形成的致密油层。

致密储层的地面空气渗透率小于 1mD,地下覆压渗透率小于 0.1mD。单井一般无自然产能,需要通过大规模压裂才能形成工业产能。中国和北美致密油气储层特征有明显区别,北美致密油层储层孔隙度在 5%~13% 范围内,而地下渗透率大约 0.01~1.0mD;我国现已发现致密油储层的孔隙度均相对较低,一般小于 12%,地下渗透率大多在 0.005~0.2mD 之间(邹才能等,2015;王晓琦等,2015)。我国的致密储层除了物性差外,其非均质性也较强。2014 年美国的致密油产量已达约占美国石油总产量的 36.2%(EIA,2015)。这使得美国石油对外依存度已降至 39.1%。

1.2 非常规储层的孔径分布

多种设备可用来探测页岩孔隙分布特征。由于每种设备所探测的孔径范围有限,即使多种技术综合使用,人们仍难以窥见其全貌,只能是“横看成岭侧成峰”。目前常采用的设备有聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB-SEM)、场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)等电子显微成像技术以及 Nano-CT、能谱仪(EDS)、高压压汞(MICP)、低温低压氮气吸附实验、核磁共振光谱(NMR)、小角散射(SAS)等,如图 1.1 所示。

为了描述方便,人们按孔径大小对页岩孔隙进行分类。即使按页岩储层孔隙的大小进行分类,分类的结果也不一致。例如,在国际理论和应用化学学会(IUPAC)的分类中,孔径 < 2nm 的孔隙为微孔(micropore),孔径在 2~50nm 间的孔隙为介孔(meso-pore),孔径 > 50nm 的孔隙为大孔(macropore)。在霍多特的分类中,微孔的孔径 < 10nm,小孔的孔径在 10~

100nm 之间,中孔的孔径在 1000 ~ 100nm 之间,大孔的孔径 > 1000nm。图 1.2 给出了不同划分方法(张琴等,2015)。

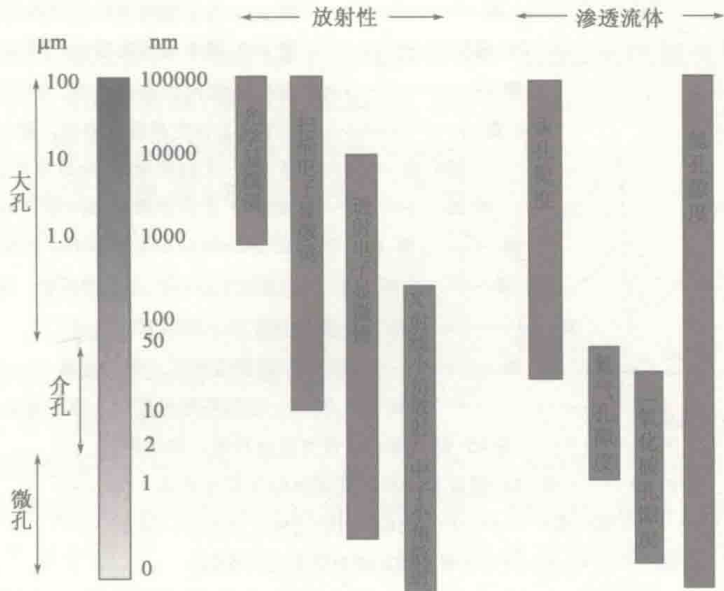


图 1.1 各种技术探测孔径的范围(据 Bustin 等,2008)



图 1.2 五种孔隙分类方法

常规油气田中,岩石的孔喉直径一般超过 2μm,而致密砂岩及页岩中的孔喉直径与其有数量级的差异。通过对全球致密储层中孔喉直径大小的统计(Nelson,2009; Passey 等,2011)发现,致密储层中页岩气储层的孔喉直径最小,致密砂岩的孔喉直径相对较大。页岩气储层孔喉直径介于 5 ~ 200nm,页岩油储层孔喉直径多分布在 30 ~ 400nm,致密气储层孔喉直径介于 40 ~ 700nm,致密砂岩油储层孔喉直径介于 50 ~ 900nm,致密灰岩油储层孔喉直径介于 40 ~ 500nm,如图 1.3 所示(邹才能等,2012)。

页岩基质是低孔低渗透储层,发育多种类型的纳米级微孔。早在 1995 年,Best 等测定了多种页岩孔隙度,发现页岩的孔径分布呈单峰态(王晓琦等,2015)。在 2000m 以内的浅层,孔径主要集中在 50 ~ 600nm 之间,以 100nm 以上的孔居多。当页岩深度增加至 3000m 时,以 60nm 的孔为主,但是其孔径分布范围更广。当页岩的深度达 4000m 以上时,孔径下降到 0.3 ~ 60nm 之间。这使得页岩的渗透率非常低。Hildenbrand 等(2002)认为可供页岩气和水流通的孔径在 20nm 左右。

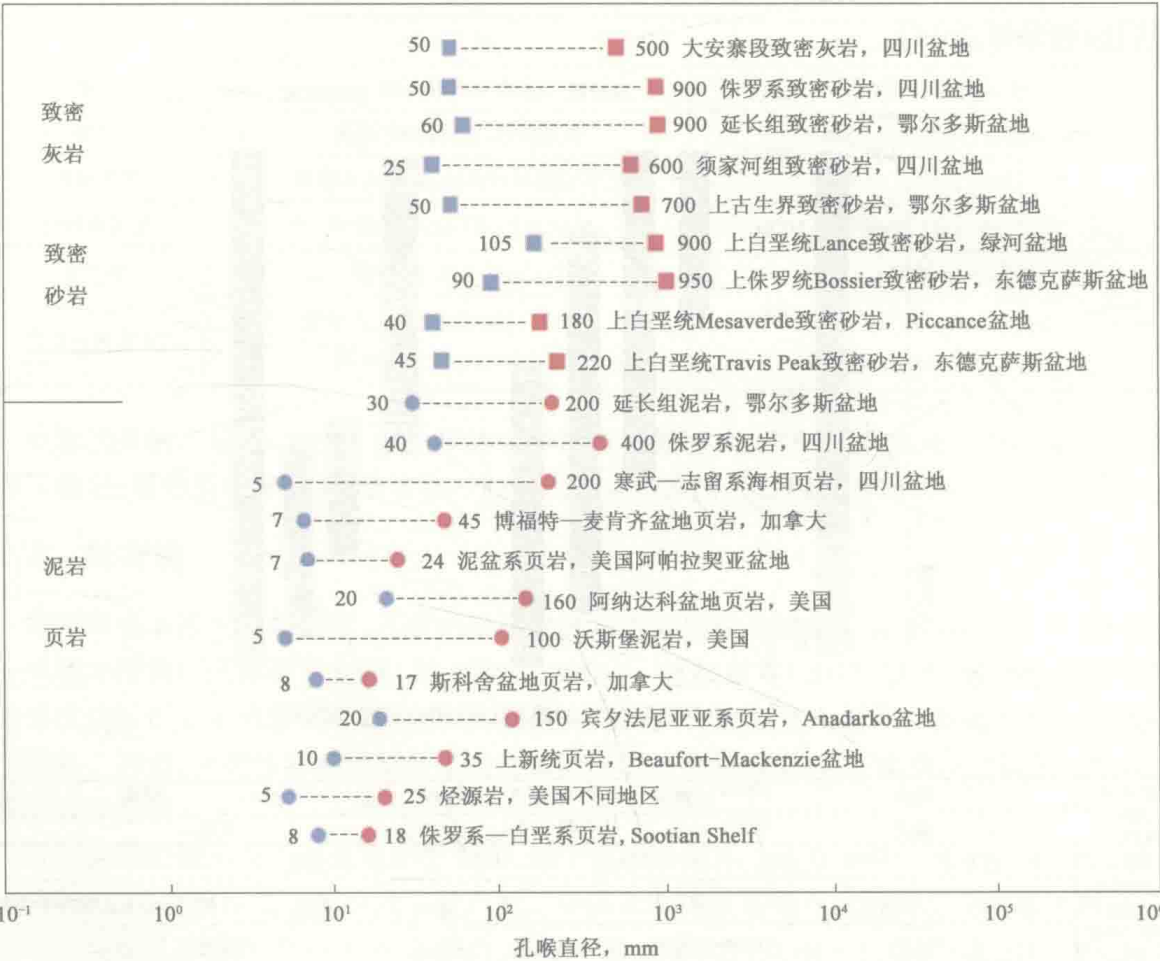


图 1.3 致密气藏及页岩气藏中岩石孔径的分布

侯宇光等(2014)发现五峰组—龙马溪组的有机质孔径一般为10~950nm,并以小于50nm为主;自流井组页岩中发育的有机质孔隙明显要少,其孔径主要为5~450nm。自流井组页岩中无机孔隙分布更普遍,主要为直径小于50nm的粒内孔隙;而在黏土颗粒内部的孔隙直径主要为30nm~4.5μm。五峰组—龙马溪组页岩的粒内孔隙直径为10nm~1.1μm。

杨峰等(2013)应用高压压汞法测试页岩孔径分布。结果表明,直径为10~20nm的孔隙为孔隙的主体,相应的孔径分布如图1.4所示。

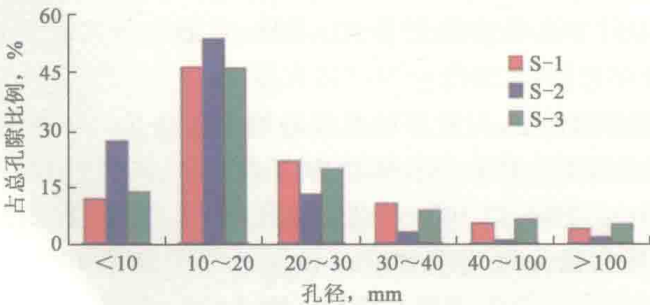
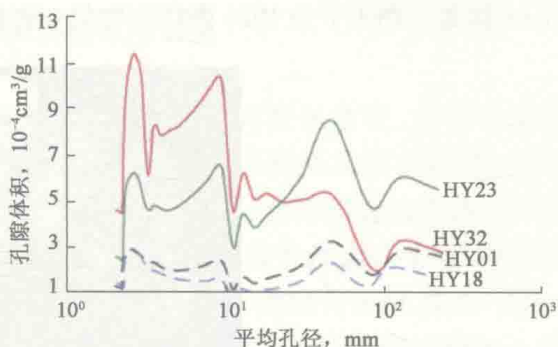


图 1.4 高压压汞获得的孔隙直径分布(据杨峰等,2013)

在压汞实验中,10nm 以下的孔隙难以准确地测量。对半径为几个纳米的微孔隙,压汞实验只有高压下才能识别,且结果偏差相对较大。例如,半径为 3.7nm 的孔隙,压力须达到 200MPa 才能被识别(杨峰,2013)。

氮气吸附可用来测量孔径为 10nm 以下的孔隙分布。但是,采用氮气吸附实验获得的孔径分布特征完全不同于扫描电镜、高压压汞实验的结果。首先,氮气吸附实验获得的平均孔径小。氮气吸附实验结果表明(侯宇光等,2014),自流井组的平均孔径为 11nm 左右,龙马溪组的孔径多介于 6~8nm 间,龙马溪组的平均孔径为 5.3nm 左右。其次,氮气吸附实验的峰值与电镜扫描的结果明显不同。例如,龙马溪组的氮气吸附实验表明,五峰组页岩小于 10nm 的孔隙最为发育,孔径峰值则在 2~3nm 间(图 1.5)。图 1.5 龙马溪组平均孔径分布(据侯宇光,2014)



另外,氮气吸附实验的孔径分布甚至呈现多峰情形。侯宇光(2014)研究的 4 个样品的平均孔径分布都出现了多个峰值。这表明,100nm 以下的孔径分布呈现出了不同的特征。

笔者也进行了氮气吸附的孔径分布实验,部分结果如图 1.6 所示。实验表明,页岩孔隙体

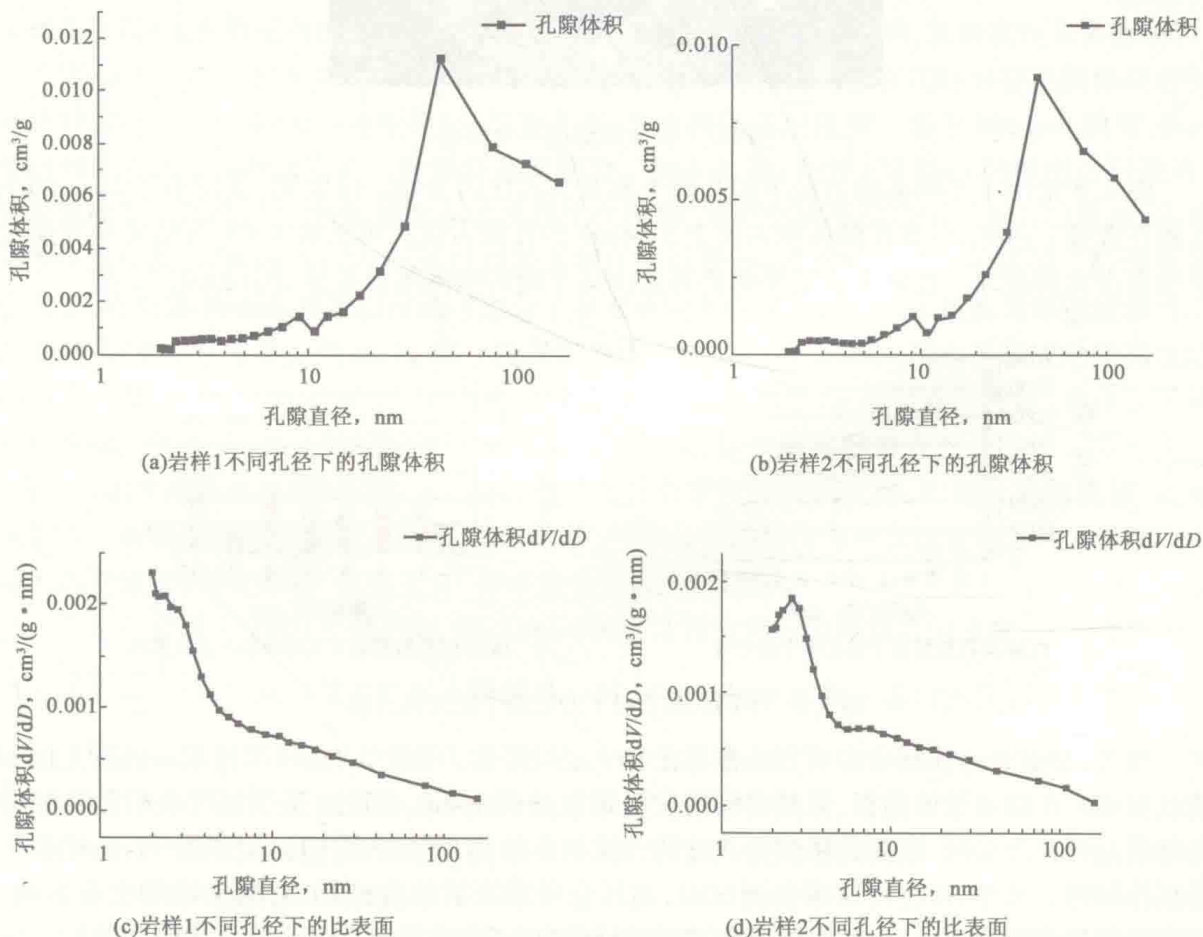


图 1.6 氮气吸附获得的孔径分布

积超过 70% 由 10nm 以上的大孔提供,但 10nm 以下的孔隙的表面积占比超过 80%。在直径为 10nm 以下的孔隙中,2 ~ 3nm 的孔隙表面积增长最快,因而平均孔径分布的峰值在 2 ~ 3nm 间。这说明微孔对吸附的贡献最大。

采用高性能 X 光成像纳米 CT 系统,对页岩岩样进行成像,得到样品的分辨率为 70nm/像素。图 1.7 是 1024 张切面中的一个切面,经过图像处理计算出孔隙度为 3.1%。

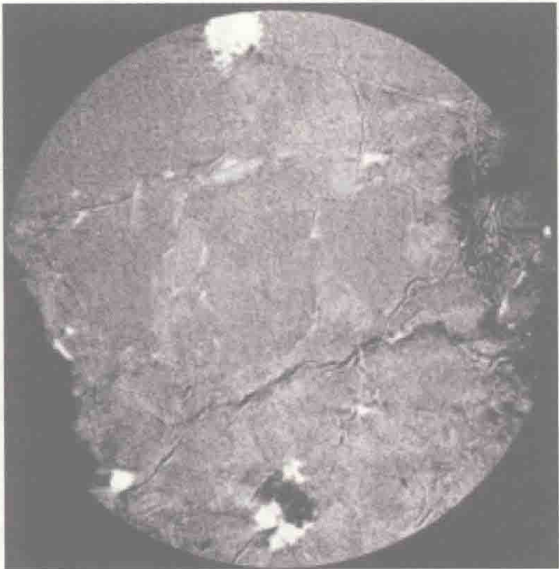


图 1.7 页岩成像的一个切面

图 1.8 给出了不同孔隙直径下的孔隙个数及其占比的分布。这表明,直径小于 2 μm 的小孔隙在数量上占优,但在孔隙体积占比上 3~4 μm 的孔隙占优。可见纳米 CT 的结果与其他结果也有很大的差异。各种方法结果的差异是由其不同的探测范围差异所引起的。

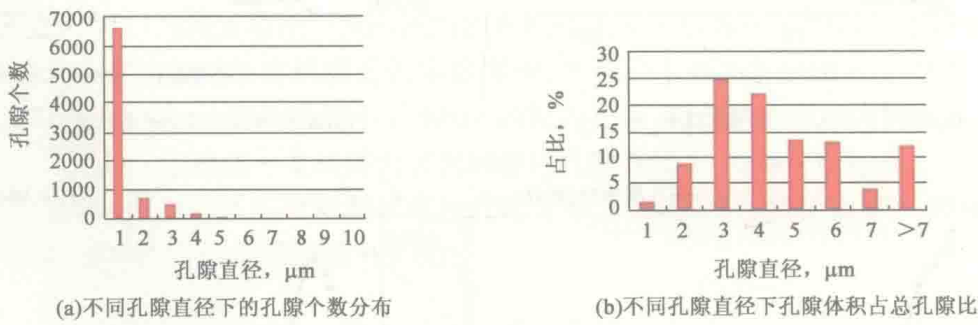


图 1.8 不同孔隙直径下的孔隙个数及其占比

总之,目前获得孔径分布的方法都存在着一定局限性。首先,纳米 CT 技术可通过无损方式获得页岩孔隙三维体数据,但其实际精度仍难以达到 10nm。其次,基于氮气吸附的孔径分布结果是解释出来的,因而无法获得孔隙的三维拓扑结构;同样,高压压汞也得不到孔隙的三维拓扑结构。另外,在进行压汞法测试时,高压会导致页岩结构破坏,对测量结果也有影响。扫描电镜技术能直接观察孔隙,但难以获得统计信息,不能直接得到其三维孔隙网络结构。各种技术都只能对一定范围的孔隙进行识别,难以获得全貌,最终呈现的结果、所得的统计规律

也不同。即使优选各个测试技术的最优测试范围,然后进行匹配衔接,希望获得页岩全孔径孔隙结构的定量表征也非易事,涉及一系列的技术难题。因此,目前仍然需要完善测试方法,提高测量精度和范围,发展数学方法,使页岩孔隙三维结构能够直观地表征出来。

1.3 非常规油气的流动机理

微尺度流动不同于常规尺度下的流动。在常规尺度下,流体的表面效应、流体在固体表面流动的速度滑移等可以忽略。在微尺度流动系统中,随着流场特征尺度的减小,边界滑移速度不能忽略,但 Navier-Stokes(简记为 N-S 方程)依然适用。然而随着流场特征尺度进一步减小,在分子平均自由程的尺度上,密度、黏度等发生变化,连续介质假定失效,无滑移边界条件下的 N-S 方程不能成立(田智威等,2009;Jeong 等,2010)。为区分不同流动,Schaaf 等(1961)以及 Beskok 等(1999)等人建议使用克努森(Knudsen)数 Kn 进行划分:当 $Kn > 10$ 时为自由分子流动;当 $0.1 \leq Kn \leq 10$ 时为过渡流; $10^{-3} < Kn < 0.1$ 时为滑移流;当 $Kn < 10^{-3}$ 时为达西流。

在页岩中,孔喉半径多在几纳米到几十纳米间,页岩的渗透率也是纳达西量级的。同时,页岩孔隙半径分布范围广,从 0.3nm 到数百纳米。因而,在不同的压力下,地层中的连续流、滑移流、过渡流和分子自由流都可能同时发生,加之吸附对流动的影响,流动机理非常复杂。

Maxwell(1879)最早进行滑移流研究,假设流体分子与壁面相互作用时只存在镜面反射和漫反射,并推导出—阶滑移速度模型,扩大了 N-S 方程的适用范围。基于 Maxwell 模型,Hsia 等(1983)提出了精度更高的二阶滑移速度模型。Beskok 等(1999)对 Hsia 的模型进行改进,并对黏度非均匀性进行建模,提出新的滑移速度模型,并声称该模型适用于所有的流态,不再局限于滑移流。Zhang 等(2010)通过对速度剖面进行拟合,提出考虑集聚效应的二阶滑移速度模型,并指出 Beskok 模型因没能考虑分子集聚效应而存在误差。后来新的滑移速度模型不断涌现,但都存在差异。例如,Ng 基于流量等效的方法(Ng 等,2005),提出了相应的滑移速度模型,并声称对 $Kn < 88$ 的流动都适用。事实上,Beskok 模型与 Ng 模型在过渡流、自由分子流阶段有很大的差异(查文舒等,2015)。可见,不同的滑移速度模型都有存在差异。更为重要的是,前面的滑移速度模型研究无一是对页岩及页岩气开展研究的,而是针对微机械、碳纳米管等开展研究所得的结果。因而,固壁分子、气体分子的特性与页岩及其页岩气的性质都有很大的差异,因而完全的“拿来主义”并不符合页岩实际情况。

在多孔介质流动中,直到 1941 年,Klinkenberg 才首先进行滑移效应的研究,认为滑移效应可表述为 $\frac{b}{p}$ 。随后众多学者针对不同的岩心对 Klinkenberg 常数 b 进行测定(Heid 等,1950;Jones、Owens;1979;Florence 等,2007)。现在,人们已普遍认识到,Klinkenberg“常数 b ”不是常数,而是压力、渗透率、迂曲度等的函数。随着页岩气革命的到来,人们开始重视页岩气流动机理的研究,并基于微尺度流动的理论成果,推导出了相应的视渗透率模型(Civan,2010;Civan 等,2011;Niu 等,2014;Zhang 等,2015)。

在众多的视渗透率模型中,除采用克努森数表述的模型外,另一类模型是 Javadpour(1999)提出的基于圆柱形纳米管的流动模型。该模型将滑移流与克努森扩散进行叠加,从而