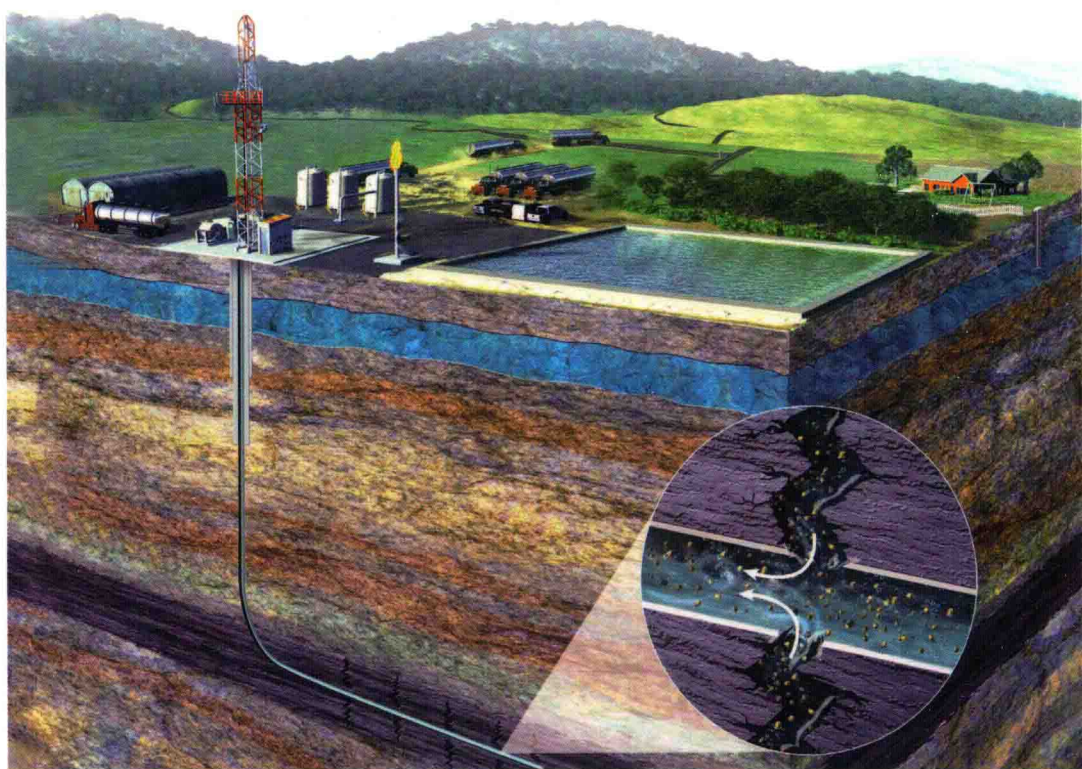


油气藏渗流理论与开发技术系列

页岩气藏有效开发 非线性渗流理论及方法

朱维耀 宋付权 尚新春 宋智勇 郭肖 著



油气藏渗流理论与开发技术系列

页岩气藏有效开发 非线性渗流理论及方法

朱维耀 宋付权 尚新春 宋智勇 郭肖 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书通过实验、理论推导、数值模拟计算和现场实际应用相结合的方法建立反映页岩气多尺度、多流态流动特征的非线性渗流理论,主要包括各种复杂渗流机理、渗流规律、各类稳定渗流、不稳定渗流、含水条件下的页岩气体渗流、多场耦合作用渗流的非线性数学模型等;重点论述页岩气多尺度、多流态及多重介质流动规律及实验技术,页岩气开发多尺度、多流态、多区耦合非线性渗流理论,页岩气开发多场耦合非线性渗流理论、非线性渗流理论在工程中的应用等;系统构建了页岩气开发的非线性渗流理论。

本书适合石油工程领域的科研人员、技术人员、高等院校的教师、本科生及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气藏有效开发非线性渗流理论及方法/朱维耀等著. —北京:科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-056422-1

I. ①页… II. ①朱… III. ①油页岩-油田开发-渗流-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第015374号

责任编辑:万群霞 耿建业/责任校对:彭 涛
责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年4月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:370 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

页岩气是除常规油气和天然气水合物以外的最大油气资源,且资源丰富。据美国国家石油委员会(The National Petroleum Council, NPC)统计,截至2007年年底,全球页岩气资源量占非常规气资源量近50%,开采页岩气潜力巨大,正日益受到关注。页岩气藏具有“自生自储”、赋存方式复杂等特点,虽然目前已在页岩气成藏机理、资源评价等方面取得了巨大进步,但在页岩气藏多尺度流动规律研究方面仍处于空白,在流固耦合渗流理论方面的研究仍基于常规气藏开采的理论。目前,国内外还没有页岩气开采的多场耦合作用机理、非线性渗流理论、高效开发整体优化理论等方面的系统研究成果。为此,迫切需要建立和形成以页岩气藏开发的非线性渗流理论为指导,以期对页岩气藏开发给出开采的规律性认识,从而为页岩气藏的高效、科学开发提供理论支撑。

本书是笔者在跟踪国内外理论和技术研究的基础上,经过近年来的系统研究,通过室内渗流物理模拟实验、理论方程建立、数值模拟计算和现场实际应用相结合的方法建立的反映页岩气藏渗流特征的非线性渗流理论,并取得了原创性成果;该理论经矿场大范围工业化应用和验证,取得了较好的页岩气藏开发效果。本书是反映页岩气藏开发领域的最新科技研究成果的专著,解答了目前页岩气藏开发中诸多认识不清的问题。目前已出版的渗流理论、油气藏工程类图书涉及上述部分内容的较少,因此希望本书能为油气田开发的科研人员和工程技术人员、大专院校师生在油气藏开发的学习和应用中起到积极的作用,也希望对气田的开发起到推动作用。

全书共十章:第1章、第2章介绍页岩气藏的基本特征、页岩气藏开发技术及开发方法;第3章、第4章重点介绍页岩气藏多重介质多尺度流动规律;第5章介绍页岩气开采压力传播动边界渗流问题;第6章、第7章介绍各种井型多区耦合稳态、非稳态渗流数学模型;第8章、第9章、第10章重点介绍页岩气开采多场耦合作用规律、多场耦合非线性渗流理论及快速数值模拟方法;同时书中还介绍了非线性渗流理论的实际应用。

本书内容是国家重点基础研究计划(973)项目“页岩气多场耦合非线性渗流理论研究”(课题编号:2013CB228002)的部分研究成果,感谢国家科学技术部的支持。感谢亓倩、马东旭、刘嘉璇、于俊红、邓佳等博士研究生们为本书成果的研究做出了大量的贡献,也感谢科研团队的同事对本书给予的支持和帮助。

由于时间仓促及作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2017年11月20日

目 录

前言

第 1 章	页岩气藏的基本特征	1
1.1	页岩气的概念	1
1.2	储层特性	3
1.2.1	页岩储层岩性及有机质特征	3
1.2.2	页岩储层微观孔隙结构特征	4
1.2.3	层理页岩储层渗透率各向异性	11
1.2.4	页岩储层孔隙度与渗透率	13
1.3	页岩气赋存特征	17
1.3.1	吸附气	18
1.3.2	游离气	18
1.3.3	溶解气	19
1.4	页岩气的运移、储集和保存条件	19
1.4.1	成藏过程特征	19
1.4.2	成藏后的封盖及保存条件	20
第 2 章	页岩气藏开发技术及开发方法	21
2.1	页岩气藏水平井钻井技术	21
2.1.1	水平井钻井技术简介	21
2.1.2	水平井钻井技术的应用	22
2.1.3	现代水平井钻井技术的发展趋势	23
2.2	单一压裂水平井降压开采	24
2.2.1	多级压裂水平井技术	24
2.2.2	单一压裂水平井降压开采技术	25
2.3	“工厂化”生产模式	27
2.3.1	页岩气开发的工厂化钻井模式	27
2.3.2	页岩气开发的工厂化压裂模式	29
第 3 章	页岩气藏多重介质多尺度流动规律	34
3.1	纳微米孔隙中的流动	34
3.1.1	吸附-解吸(实验、数学)模型	34
3.1.2	页岩气储层扩散系数测试	38

3.1.3	页岩气储层滑脱因子测试	41
3.1.4	页岩储层渗流规律实验研究	63
3.2	裂缝中的页岩气流动规律	65
3.2.1	微裂缝页岩渗流规律	65
3.2.2	裂缝页岩渗流规律	68
3.3	页岩气储层多尺度多流态流动规律及统一模型	76
3.3.1	页岩储层页岩气多尺度流动状态分析	77
3.3.2	考虑扩散和滑移作用的多尺度非线性流动模型	80
3.3.3	页岩气储层多尺度非线性渗流模型	84
第4章	含水条件下多尺度渗流规律	90
4.1	纳微米管束气-水流动规律	90
4.1.1	实验材料、仪器及方法	90
4.1.2	实验结果及分析	92
4.2	裂缝性岩心气水渗流规律	95
4.2.1	人工裂缝特征对页岩渗流规律的影响	95
4.2.2	岩心的气-水两相流动	103
4.3	多尺度岩心水渗吸	107
4.3.1	水在页岩中的赋存状态分布特征	107
4.3.2	水在页岩中的微观渗吸实验	111
4.3.3	页岩中水的宏观渗吸实验	122
4.3.4	水对页岩破裂强度的影响	125
4.4	压裂液伤害对渗流的影响	144
4.4.1	实验材料	144
4.4.2	实验方法	145
4.4.3	实验结果及分析	145
第5章	页岩气开采压力传播动边界渗流问题	153
5.1	直井压力传播动边界渗流数学模型	153
5.2	压裂井压力传播动边界渗流数学模型	157
5.2.1	单一裂缝直井动边界传播模型	157
5.2.2	复杂裂缝直井动边界传播模型	158
5.2.3	多级压裂水平井动边界传播模型	163
5.3	页岩气渗流压力传播规律	163
5.3.1	页岩气储层直井渗流压力传播规律	164
5.3.2	页岩气储层压裂水平井渗流压力传播规律	164
5.4	压力传播动边界影响因素分析	166

第 6 章 页岩气开采直井渗流数学模型	173
6.1 直井开采稳态产能模型	173
6.1.1 考虑解吸的直井稳态压力分布	173
6.1.2 页岩气压裂直井开采稳态产能模型	175
6.1.3 页岩气直井开采压力及产能影响因素分析	178
6.2 直井开采非稳态产能模型	183
6.2.1 考虑解吸的直井开采非稳态压力分布	183
6.2.2 页岩气压裂直井开采非稳态产能模型	186
6.2.3 页岩气直井开采非稳态压力及产能影响因素分析	190
第 7 章 多级压裂水平井多区耦合渗流数学模型	197
7.1 多级压裂水平井多区耦合物理模型	197
7.1.1 I 未改造区	199
7.1.2 II 改造区	199
7.1.3 水平井筒区	200
7.2 多级压裂水平井多区耦合渗流模型	200
7.2.1 不同缝网形态等效渗透率模型	202
7.2.2 不同缝网形态对产气量影响因素分析	206
7.3 多级压裂水平井稳态开采产能模型	209
7.3.1 页岩气储层压裂水平井稳态渗流缝网产能模型	209
7.3.2 页岩气储层压裂水平井稳态渗流缝网产能模型影响因素分析	215
7.4 多级压裂水平井非稳态开采产能模型	219
7.4.1 页岩气储层多级压裂水平井非稳态渗流缝网产能模型	219
7.4.2 页岩气储层多级压裂水平井非稳态渗流缝网产能模型影响因素分析	221
7.5 生产数据拟合	224
7.5.1 区块概况	224
7.5.2 地质背景	225
7.5.3 实验室或现场测量资料	228
7.5.4 现场生产动态资料	232
7.5.5 生产数据拟合	233
第 8 章 页岩气开采多场耦合作用机理	240
8.1 应力场耦合作用对页岩渗流规律的影响	240
8.1.1 岩样选取及物性	240
8.1.2 实验设备及实验方法	241
8.1.3 实验结果与分析	241
8.2 渗流场-应力-介质变形耦合作用机理	249
8.2.1 实验样品选取及物性	249

8.2.2	实验设备与实验方法	249
8.2.3	Biot 系数实验结果与分析	250
第 9 章	水平井分段压裂多场耦合非线性渗流理论	254
9.1	页岩气输运的多场耦合作用机理	254
9.1.1	流-固耦合	254
9.1.2	流-热耦合	255
9.1.3	固-热耦合	255
9.2	流-固耦合理论基础	255
9.2.1	渗流场的控制方程	255
9.2.2	应力场控制方程	257
9.3	页岩气水平井流-固耦合简化数学模型	258
9.4	页岩气水平井流-固耦合参数的非均匀分布模型	260
9.4.1	已有的水力压裂页岩储层的介质模型	260
9.4.2	孔隙度的非均匀全流场分布模型	261
9.4.3	固有渗透率的非均匀全流场分布模型	263
9.4.4	弹性模量的非均匀模型	264
9.4.5	Biot 系数模型	265
第 10 章	页岩气藏多场耦合数值模拟方法	266
10.1	页岩气产能预测问题的压力场数值模型	266
10.2	快速模拟方法及算例分析	267
10.3	流-固耦合效应对页岩气产能预测的影响	270
10.3.1	弹性模量的影响	270
10.3.2	Biot 系数的影响	270
10.3.3	泊松比的影响	271
10.3.4	在不同区域上流-固耦合效应的强弱分析	272
10.4	压裂缝网特征对产量的影响	273
10.4.1	缝网分布形式的影响	273
10.4.2	多级压裂缝排列方式对产量的影响	274
10.5	不同区块典型生产井的模拟验证和产量预测	277
	参考文献	281

第1章 页岩气藏的基本特征

1.1 页岩气的概念

页岩气是产自以富有机质页岩为主的储集岩系中的非常规天然气^[1]。全球页岩气资源非常丰富,据美国能源信息署预测,全球页岩气资源量为 $187 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。页岩储层与常规砂岩储层相比,具有复杂的孔隙结构特征,存在大量的有机质孔隙和无机质孔隙,以及天然微裂缝和人工压裂缝。页岩储层具有低孔隙度、低渗透率、超致密的特征。页岩储层中发育有大量的纳米级孔隙,是页岩气的主要储集空间,储层中的微裂孔隙和较大的孔隙对渗透率具有较大贡献。

近年来,由于勘探开发技术取得突破并得到大规模推广,北美页岩气开发取得重大突破,在一定程度上改变了世界天然气的供给格局。在政府税收优惠和补贴政策影响下,2000年美国页岩气产量突破 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 。进入21世纪以来,随着水平井钻探及压裂技术的进步,美国页岩气勘探开发取得突破性进展,2010年美国页岩气产量高达 $1380 \times 10^8 \text{m}^3$,2011年超过 $1700 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[2],接近美国天然气总产量的30%。与美国相比,我国页岩气储层条件更为复杂,具有特殊性,具体表现在如下几个方面。

(1)我国海相页岩沉积时代老、热演化程度高、总有机碳含量相对较低,多为寒武系、志留系和泥盆系,热演化程度(R_o)普遍大于3.0%,总有机碳含量值(TOC)为2%~8%。而美国页岩气储层以泥盆系、石炭系为主, R_o 一般为1.1%~2.0%,TOC为2%~14%。页岩储层主要以纳米级有机质孔隙为主,具低孔隙度、特低渗透率致密的物性特征。美国主要产气页岩储层岩心分析总孔隙度分布在2.00%~14.00%,平均为4.22%~6.51%;测井孔隙度分布在4.0%~12.00%,平均为5.2%;充气孔隙度分布在1.0%~7.5%,充水孔隙度为1.0%~8.0%;渗透率一般小于0.1mD($1\text{D}=0.986923 \times 10^{-12} \text{m}^2$),平均喉道半径不到0.005 μm 。我国四川盆地页岩储层物性分析虽然取得了部分孔隙度资料,但渗透率因测试灵敏度低未测出。其中资2井筇竹寺组黑色粉砂质页岩样品的孔隙度分布在1.0%~2.5%,平均孔隙度为1.58%;资3井硅质页岩的孔隙度为0.12%~0.70%;威001-2井筇竹寺组页岩储层的测井孔隙度为0.69%~3.08%,平均值为1.64%,渗透率为0.001~0.110mD,平均值为0.019mD;阳深2井龙马溪组测井解释孔隙度一般为1.0%~5.0%;阳63、隆32等井在龙马溪组已测试获气流。可见,四川盆地上古生界页岩具备储集条件。与北美页岩气相比,我国页岩气储层纳米孔隙分布

特征存在差异。因此,针对我国页岩气储层分布特点,对纳微米尺度孔隙渗流机理进行研究,具有重要的意义。

(2)我国海相页岩构造改造强烈,页岩储层受多次改造,断裂发育,页岩气保存条件欠佳^[2-5],而美国页岩构造活动简单,断裂稀少,页岩气保存条件相对较好。常规储层压裂多形成单一裂缝,而页岩储层的复杂层理、裂缝性特征决定了压裂可能形成更为复杂的裂缝或裂缝网络。美国页岩气藏成功开发的实践表明,压裂改造是实现页岩储层有效开发的主体技术。目前美国约有85%的页岩气井采用的是水平井与分段压裂技术相结合的方式,可以最大限度地增大复杂裂缝网络与基质的接触面积,增产效果显著。页岩气的产量主要取决于缝网发育程度,即人工改造区(SRV)裂缝发育程度。在人工改造区存在大量带有支撑剂的裂缝、无支撑剂的裂缝及天然微裂缝,这些微裂缝在页岩气开发中具有重要的作用。由于我国特殊的地质构造背景,决定了我国页岩气储层裂缝具有尺度多样性、分布复杂性等特点^[6, 7]。在开发过程中,降压开采产生应力场变化导致介质变形,流-固耦合问题凸显,流动规律不明,因此,研究不同裂缝渗流机理、分布特征及流-固耦合作用势在必行。

(3)我国页岩气储层埋藏深,一般为1500~4000m,地表条件复杂,而美国页岩气储层埋深为1000~3000m,地表多为平原。由于埋藏深度存在差异,地应力作用也不相同,储层多孔介质岩石在不同的应力作用下的力学性质对渗流特征的影响也不尽相同。因此,针对我国页岩气的埋藏特点,有必要对不同应力条件下岩石的力学性质变化规律及应力场对渗流场的作用规律进行研究,为我国页岩气开发过程中钻井工艺和产能预测提供技术支持。

综上所述,照搬国外的理论无法满足我国页岩气的开发要求。因此,亟待针对我国页岩气的特点进行纳微米尺度孔隙流动机理及流-固耦合作用机理进行研究。此外,页岩储层压裂液与储层的耦合作用也与其他气藏存在差异。目前在页岩储层水力压裂过程中,压裂液返排率较低,导致大量压裂液滞留在缝网系统。压裂液返排与产气量的关系与常规储层存在较大的差异。压裂液的存在对页岩缝网的导流能力及储层的物性都有影响。残留压裂液的去向及对应力场变化的影响,残留压裂液的赋存状态与渗流的关系,对气井产能的影响,与常规气藏差异的产生机理,储层的吸水特性,以及对页岩流-固耦合渗流的影响等问题亟待探索。

页岩储层具有复杂的孔隙特征,包括纳米级孔隙、微裂缝、人工压裂缝等。储层具有多尺度的渗流特征,并且在开发过程中存在应力场的流-固耦合作用,以及压裂液与储层的流-固耦合作用。目前关于页岩气开采的流固耦合的渗流规律的研究尚不深入。因此,亟待对人工改造区缝网多重介质多尺度流动的流固耦合流动问题进行深入研究,为提高页岩气的产气能力提供理论支撑,从而促进页岩气藏的开发和有效动用。

1.2 储层特性

页岩通常被定义为“细粒的碎屑沉积岩”，但它在矿物组成(黏土质、石英和有机碳等)、结构和构造上却多种多样。含气页岩并不仅仅是单纯的页岩，它也包括细粒的粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩及灰岩、白云岩等。页岩作为岩层，为不同颗粒大小和不同岩性的混合。

页岩储层具有丰富的储集空间类型，通过对不同类型孔隙统计可知，我国南方海相页岩(筇竹寺组/龙马溪组)中多发育矿物粒间孔、有机质孔、粒内溶蚀孔及成岩收缩缝，这些孔隙是页岩气的主要储气空间。

1.2.1 页岩储层岩性及有机质特征

1. 实验仪器

采用德国布鲁克公司 D8 Discover X 射线衍射仪(图 1.1)。前期调研选型阶段做了深入细致的工作，包括带实际样品到各大厂家相关仪器上实测，最后选定了国内同行业极为鲜见的 UMC150 样品台为核心，配置新型林克斯探测器、测角仪、低角度附件的技术配置组合。

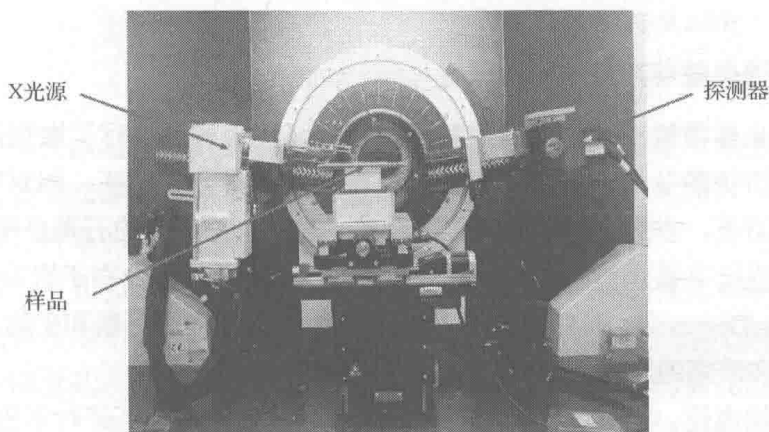


图 1.1 德国布鲁克公司 D8 Discover X 射线衍射仪

2. 实验结果

通过全岩 X 射线衍射分析，发现龙马溪组页岩四块岩样矿物成分以石英和黏土矿物为主(图 1.2)。其中石英含量为 37%~51%，平均为 45%；黏土矿物含量为 29%~51%，平均为 32%；其他矿物含量较少，斜长石含量约 10%；偶见少量钾长石、方解石和黄铁矿。黏土矿物以绿泥石、伊利石、伊利石/蒙脱石间层为主，

其中绿泥石的相对含量为 6%~33%，平均为 18%；伊利石的相对含量为 34%~79%，平均为 53%；伊蒙间层的相对含量为 5%~10%，平均为 33.6%，最大间层比为 10%。可见，页岩中黏土矿物含量较高。

黏土矿物是一些含铝、镁等为主的含水硅酸盐矿物；除海泡石、坡缕石具链层状结构外，其余均具层状结构；颗粒极细，一般小于 0.01mm；加水后具有不同程度的可塑性；主要包括高岭石族、伊利石族、蒙脱石族、蛭石族及海泡石族等矿物。在丰富的黏土矿物中发育大量的粒间孔隙，黏土矿物粒间孔主要起储集作用。

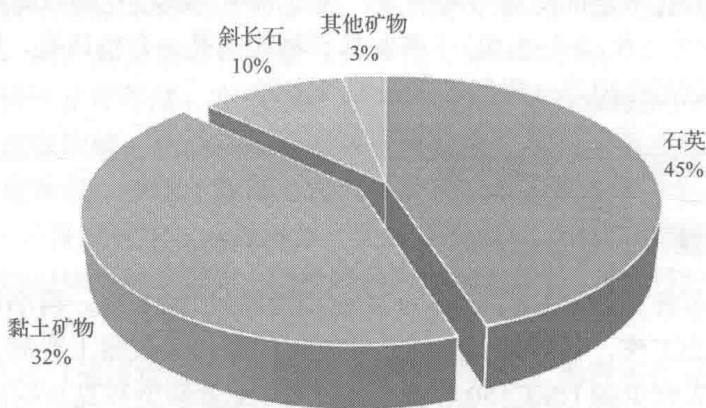


图 1.2 岩样黏土矿物含量

1.2.2 页岩储层微观孔隙结构特征

通过偏光显微镜和扫描电镜实验，对研究区页岩样品进行了微观形貌的观察和整体分布特征的分析。黑色页岩表现出相同的矿物分布特征：相对粒度较大的颗粒主要为石英、方解石、白云石、黄铁矿、云母，粉砂级的石英呈现脉状分布，其他矿物主要呈零星分布；其余的黏土矿物主要呈细分散状分布于岩石之中。辅以 EDX (Energy Dispersive X-Ray) 能谱分析，页岩矿物的微观形貌和矿物分布特征得到较为直观和清晰的观察。

通过扫描电镜，对下志留统龙马溪组页岩孔隙的形态特征进行了观察和分析。

1. 实验方法

对研究区的同一组样品进行了环境扫描电镜的实验测试，主要进行页岩样品微观形貌和孔隙特征的分析 and 观测，获得直观的认识，并依据特殊区域(孔隙形态发育区、不同孔隙类型区、多孔隙区等)进行能谱标定，辅助确定该孔隙的发育位置和类型。样品数量为 12 (龙山 1 井样品数为 7，黔江剖面样品数为 5)，原则为等间隔 3m 取样，结合岩性变化特征和特殊矿物(黄铁矿集中部位、方解石脉体发

育部位等)加密取样,从制样方法和实验方法均严格按照分析测试中心及相关规定进行。

1) 制样方法

下志留统龙马溪组底部所钻取的 30 余米岩心样品,主要岩性为黑色泥页岩,发育水平层理和微波状层理,局部可见黄铁矿出现,整个层段局部发育亮晶方解石脉体。在实际制样过程中,样品的规格按照分析测试中心规定,切样方向为垂直层理的方向,通过观察自然断面和氩离子抛光两种手段对岩样进行处理。由于泥页岩导电率低,为了达到最佳的观测效果,在进行自然断面观察时,对岩样表面进行了喷金处理(图 1.3)。

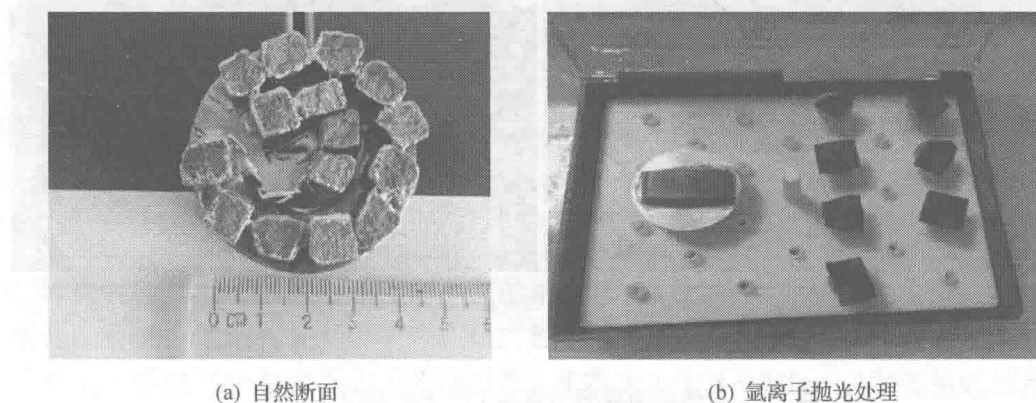


图 1.3 页岩岩样处理方法对比

油气储层孔隙结构研究的主要技术手段有铸体薄片分析法、高压压汞法、低温氮气等温吸附法和扫描电镜法等。应用铸体薄片分析法研究时,由于普通光学显微镜受到分辨率的限制,难以观察铸体薄片中的纳米级孔隙。高压压汞法常用于测试连通的中孔和大孔。低温氮气等温吸附法侧重于表征微孔和中孔的孔隙结构。扫描电镜技术不能分辨在机械抛光过程中由于页岩表面硬度不同所造成的不规则形貌和纳米孔,难以识别新鲜断面上由于样品破裂造成的假孔隙。由于页岩储层的平均孔径只有纳米量级,在制备页岩实验样品时要采用特殊手段防止样品制备过程中造成污染,常规的技术手段不能有效描述页岩的孔隙结构和表面形态,就需要将多种实验方法相结合。笔者等使用氩离子抛光技术对页岩样品表面进行刻蚀处理,然后采用高分辨率场发射环境扫描电镜直接观察页岩表面的纳米级孔隙结构形态,并对页岩储层孔隙类型进行划分(图 1.4)。

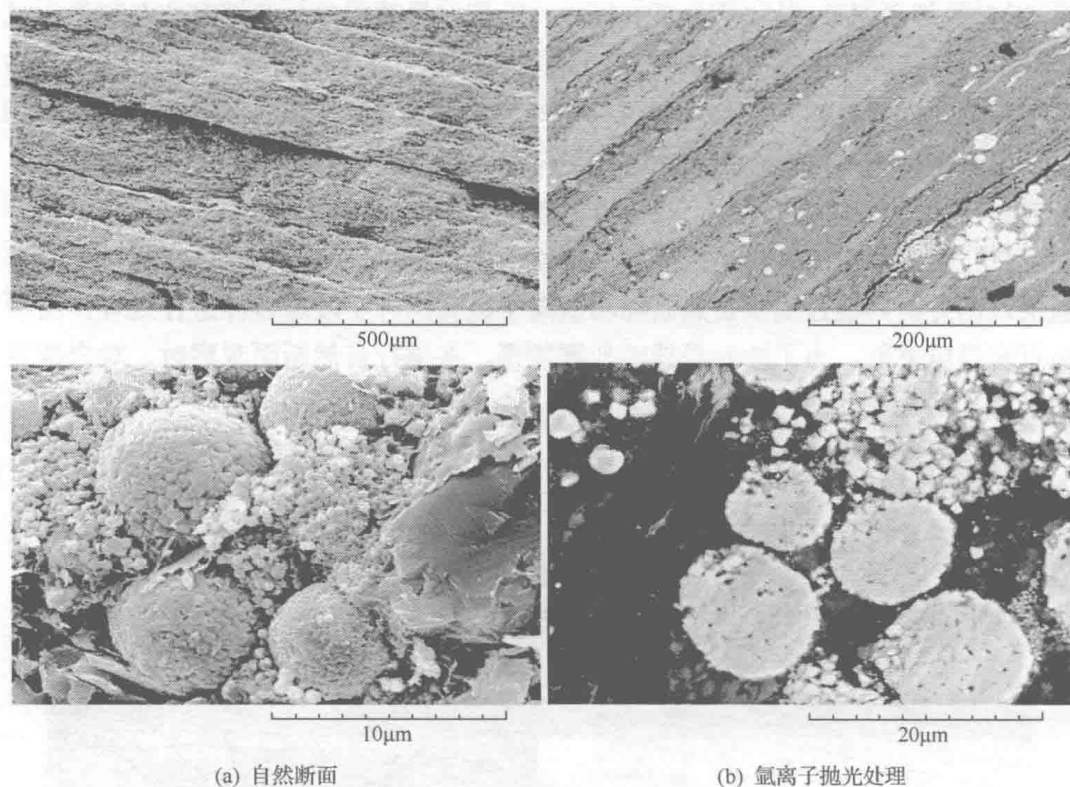
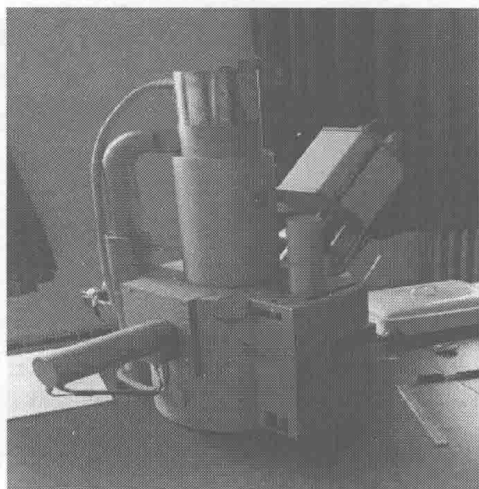


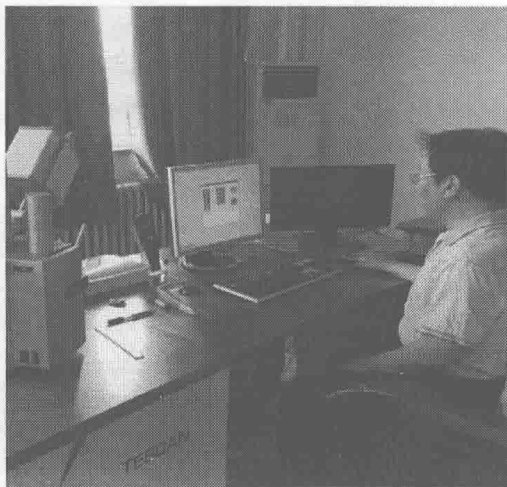
图 1.4 自然断面观察与氩离子抛光处理镜下对比

2) 测试仪器及方法

本次实验地点为中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司勘探开发研究院分析测试中心,使用仪器为 FEI QuantaTM250,主要仪器参数:高真空模式分辨率[$\leq 3.0\text{nm}@30\text{kV}(\text{SE})$; $\leq 4.0\text{nm}@30\text{kV}(\text{BSE})$; $\leq 8\text{nm}@3\text{kV}(\text{SE})$],低真空模式分辨率[$\leq 3.0\text{nm}@30\text{kV}(\text{SE})$; $\leq 4.0\text{nm}@30\text{kV}(\text{BSE})$; $\leq 10.0\text{nm}@3\text{kV}(\text{SE})$],环境真空模式分辨率[$\leq 3.5\text{nm}@30\text{kV}(\text{SE})$].放大倍数为 6 倍~100 万倍,加速电压为 0.2~30kV。EDX 为电制冷能谱仪,型号为 Bruker QUANTAX400-10。主要参数:探测芯片有效探测面积为 10mm^2 ;能量分辨率, MnKa 分辨率优于 129eV(测试条件为 1000~100000cps);最大输入计数为 1000000cps;最大输出计数为 400000cps。窗口类型为超薄轻元素探测窗口。元素探测范围为 Be(4)~Am(95);可支持 4096×3072 像素分辨率的 Mapping。系统稳定性为 1000000cps 以内输入计数,谱峰偏移不超过 1eV。选定样品数为 12,进行页岩微观形貌的高真空观测(图 1.5)。



(a) 扫描电镜



(b) 电镜能谱分析仪

图 1.5 扫描电镜实验装置

2. 孔隙类型

页岩中有机质颗粒内部存在丰富的纳米级孔隙,称为有机质孔隙或有机质纳米孔。有机质纳米孔是页岩中存在最广泛的孔隙类型之一,一块直径为几个微米的有机质颗粒可含有成百上千个纳米孔。孔隙大小为 $8\sim 950\text{nm}$,主要呈近球形或椭圆形,此外也有其他不规则形状,如弯月形和狭缝形等。部分有机质纳米孔附近散布大量的黄铁矿颗粒。但并不是所有的有机质都发育纳米孔,其与有机质成熟度有关,低成熟度的有机质颗粒孔隙较少。

有机质孔隙的孔径一般为纳米级,表现为吸收孔隙,是吸附态赋存的天然气主要储集空间。生油层中的有机质并非呈分散状,主要是沿微层理面分布。据进一步研究证实,生油岩中还存在三维的干酪根网络。微层理面可以理解为层内的沉积间断面,其本身有相对较好的渗透性,再加上相对富集的有机质可使其具有亲油性,若再有干酪根的相连,那么在大量生气阶段,易形成相互连通的、不受毛细管阻力的亲油网络,是页岩中天然气富集的重要孔隙类型之一。微孔直径一般小于 2nm ,中孔直径为 $2\sim 50\text{nm}$,大孔隙直径一般大于 50nm 。随孔隙度的增加,孔隙结构也发生变化(微孔变成中孔甚至大孔隙),孔隙内表面积随之增大。另外,这些分散有机质的表面是一种活性非常强的吸附剂,也能极大提高页岩的吸附能力,并且伴随着成熟度的增加,有机质热生烃演化还会形成一些微孔隙。黑色页岩中残留的沥青也属于该类孔隙,天然气主要以吸附态甚至溶解态赋存在沥青中(图 1.6)。

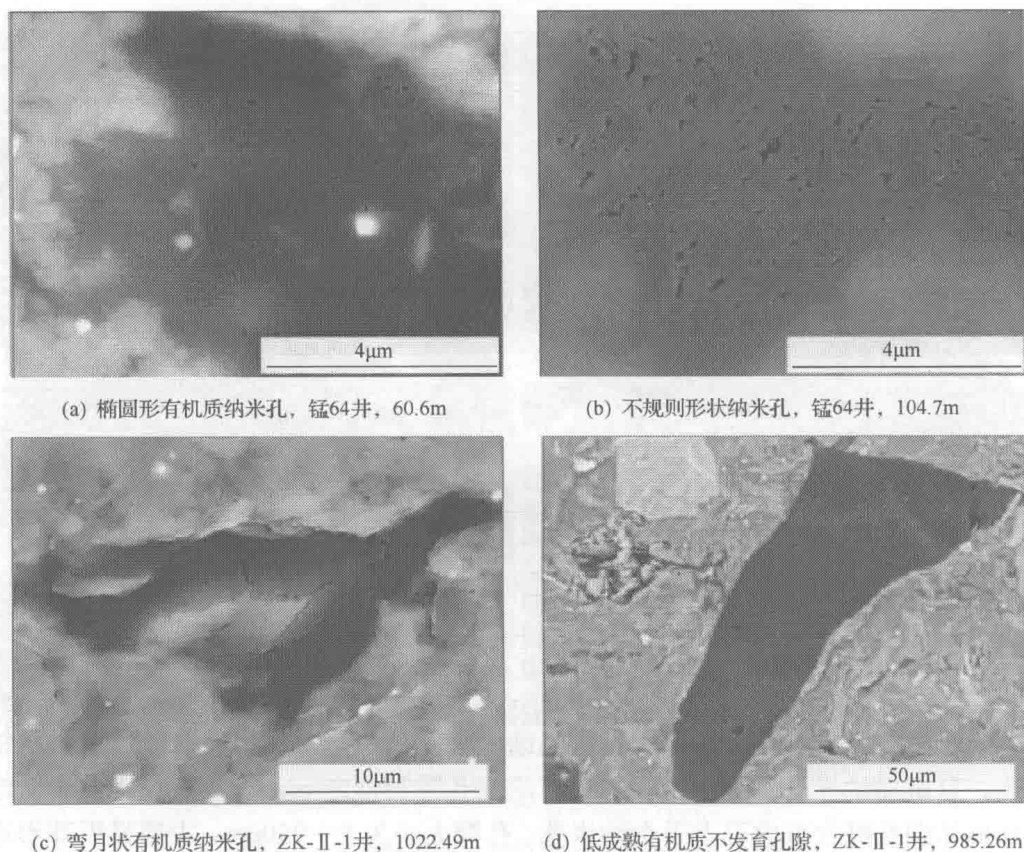


图 1.6 四川盆地及其周缘下古生界黑色页岩有机质孔^[8]

(1) 粒间孔。

粒间孔通常发育于矿物颗粒接触处, 孔隙呈现出多角形和拉长形, 多数为原生孔隙, 呈分散状分布于基质中, 排列一般无规律, 粒间孔孔径多大于 100nm (图 1.7)。分析认为, 多角形孔多为软硬颗粒间经压实胶结后剩余的孔隙空间; 线型孔多与层状黏土矿物有关。本次实验中黏土矿物粒间孔大量存在, 并多发育于伊蒙混层聚合物(絮状)中, 其内部具纸房子微观构造。纸房子构造呈开放型, 因而存在大量的孔隙空间, 孔隙之间具有一定的连通性, 能为气体导流提供微观运移通道, 同时增强气体渗透能力。

(2) 粒内孔。

黏土矿物层间粒内孔是本次实验中发现的最广泛发育的孔隙类型, 其他矿物较少见。粒内孔孔径相对较小, 从几纳米至几十纳米。黏土矿物, 特别是化学不稳定矿物, 如蒙脱石在沉积埋藏转变为伊蒙混层或伊利石的过程中会产生大量粒内孔, 这些层间微孔隙大大增加了页岩气赋存的空间。早期浅埋泥页岩发育的大量粒间孔及少量的粒内孔连通性很好, 是非常有效的孔隙网络。在丰富的黏土矿物中发育大量的粒内孔(图 1.8)。伊利石呈现为薄层片状或纤维状, 片层之间发育