

北美页岩气压裂技术

陈万钢 吴建光 王 力 李 亭 编著



科学出版社

北美页岩气压裂技术

陈万钢 吴建光 王 力 李 亭 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以介绍北美页岩气压裂技术为目的,重点介绍美国石油工程师协会(SPE)在页岩气压裂领域的技术,包括页岩气压前评价、压裂液体系、支撑剂、缝网压裂设计和施工工艺、裂缝监测、压裂效果分析、重复压裂及压裂返排液处理等方面的内容。

本书适合从事页岩气压裂的技术人员和管理人员参考阅读,也可供在校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

北美页岩气压裂技术 / 陈万钢等编著. —北京: 科学出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-03-057069-7

I. ①北… II. ①陈… III. ①油页岩-压裂 IV. ①TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 063119 号

责任编辑: 焦 健 刘文杰 / 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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张: 12

字数: 300 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

能源是人类社会生存发展的重要物质基础，攸关国计民生和国家战略竞争力。美国页岩气革命对国际天然气市场及世界能源格局具有重大影响，世界主要资源国都加大了页岩气勘探开发力度。中国具备大规模开发页岩气的潜力。2015 年国土资源部资源评价结果显示，我国页岩气技术可采资源量为 21.8 万亿 m^3 ，其中海相为 13.0 万亿 m^3 、海陆过渡相为 5.1 万亿 m^3 、陆相为 3.7 万亿 m^3 。页岩气压裂技术的突破是中国页岩气成功开发的关键。页岩气压裂技术理论、工艺都与常规压裂技术有显著差别。

本书编写的目的就是系统地向国内相关技术人员介绍北美页岩气压裂的理论、工艺及实践，使读者较为系统地掌握页岩气压裂理论及工艺知识，对国内页岩气开发提供指导及帮助。本书编写前，虽已有专家、学者发表了大量文献介绍北美页岩气压裂技术，但都缺乏整体的、系统的报道。由于本书材料源于公开发表的文献，部分内容在国内已有报道，可能出现重复，希望各专家学者对本书抱以学术交流、促进行业发展的态度进行审视。

本书系统总结了北美页岩气压裂技术领域近年来撰写的论文、报告，对压裂技术每个环节都进行了梳理，详细介绍了页岩气压裂理论及工艺。本书共包括 10 章。第 1 章、第 2 章由王力和李亭编写；第 3 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章、第 10 章由陈万钢编写；第 5 章、第 6 章由陈万钢和李亭编写；第 9 章由李亭编写。许冬进参与了压裂工艺部分编写，李少明参与了缝网压裂设计部分编写，毛峥、刘文博参与了图表、部分文字的输入修改等工作。全书由吴建光校稿。

本书在编写过程中得到了中联煤层气有限责任公司、国家“十三五”科技重大专项“临兴-神府地区煤系地层煤层气、致密气、页岩气合采示范工程”和长江大学的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于编写人员水平有限，本书难免存在不足，敬请各位读者批评指正。

作 者

2018 年 2 月

目 录

前言

第1章 北美页岩气开发历程	1
1.1 基本概念	1
1.2 页岩气的评价	3
1.3 美国页岩气开发历程	3
1.4 加拿大页岩气开发历程	8
第2章 页岩气压前评价技术	9
2.1 页岩气地质储量	9
2.2 压前评价参数	10
2.3 压前评价方法	13
第3章 页岩气压裂液体系	22
3.1 滑溜水压裂液体系	22
3.2 线性胶压裂液体系	29
3.3 其他压裂液体系	30
3.4 压裂液优化需要考虑的因素	37
第4章 支撑剂	38
4.1 有效支撑裂缝网络对产能的影响	38
4.2 页岩气常用的支撑剂	42
4.3 支撑剂在裂缝中的运移与沉降	48
第5章 页岩气裂缝网络压裂设计	53
5.1 页岩气裂缝网络的形成条件	53
5.2 缝网压裂模型	58
5.3 缝网压裂设计	60
5.4 压裂参数优化影响因素	63
5.5 缝网压裂设计实例	68
5.6 缝网压裂软件简介	71
第6章 页岩气压裂施工工艺	73
6.1 直井连续油管分层压裂	73
6.2 水平井分段压裂技术的优势	73
6.3 水平井分段压裂	74
6.4 页岩气水平井分段与射孔方案优化	81
6.5 井工厂压裂模式	82

第7章 水力压裂裂缝监测	90
7.1 水力压裂监测方法	90
7.2 微地震裂缝监测	91
7.3 测斜仪裂缝监测	100
7.4 裂缝监测与产能模拟	101
7.5 压后试井解释	106
7.6 示踪剂压裂监测	112
第8章 页岩气水力压裂效果分析	113
8.1 压裂施工参数对产气量的影响	113
8.2 页岩气压裂效果的试井分析	118
8.3 页岩气压裂效果的递减分析	122
8.4 页岩气压裂效果的数值模拟分析	127
8.5 页岩气压裂效果分析的其他方法	131
第9章 页岩气重复压裂技术	136
9.1 页岩气水平井重复压裂面临的难题	136
9.2 美国页岩气水平井重复压裂概况	136
9.3 美国页岩气水平井重复压裂技术	138
9.4 重复压裂设计	144
9.5 重复压裂工艺技术	151
9.6 重复压裂技术实例	152
第10章 压裂返排液处理与环保问题	159
10.1 水源及返排液处理概况	159
10.2 水处理技术	160
10.3 压裂对地下水影响	167
10.4 页岩气开发的环境问题	168
10.5 相关环境法律法规	169
参考文献	174
本书计量单位换算	187

第1章 北美页岩气开发历程

最近几年,随着水平钻井和水力压裂技术的进步,从页岩和煤层等致密储层中开采天然气已经变得经济可行,这促使了美国天然气产量大幅度增长。目前,美国已经成为世界第一大天然气生产国,如果把加拿大的天然气产量也计算在内,那么这两个国家的天然气产量在全球天然气总产量中所占的比例已达25%以上。可以看出,页岩气在美国未来的能源和经济发展中将发挥越来越重要的作用。据美国能源信息署(EIA)预测,到2035年美国页岩气产量在其国内天然气总产量中所占的比例将从2011年的23%提高到49%。这进一步凸显了页岩气在美国未来能源结构中的重要地位。最近几年,美国的天然气一直保持在比较低的价位,而且波动比较小,这既为美国消费者节约了支出,又提升了美国的经济竞争力,带动了美国多个产业的复兴。因此,天然气的高效开发对美国经济发展有重要的推动作用。本章首先介绍页岩和页岩气的概念,然后重点介绍美国页岩气开发历程,以便对页岩气的开发技术发展趋势有所启迪。

1.1 基本概念

1.1.1 页岩

页岩和粉砂岩地层是地壳上分布最广泛的沉积岩地层,可以说页岩地层在全球各地都有分布。在石油地质中,富含有机质的页岩地层既是烃源岩也是圈闭石油和天然气的盖层。在油藏工程中,页岩地层被视为遮挡层。钻井钻遇的页岩总厚度往往要大于储集油气的砂岩层。在地震勘探中,页岩与其他岩性之间的分界面通常是良好的地震反射层。因此,不论是对于勘探还是对于油藏管理而言,页岩地层的地震和岩石物理特征以及这些特征之间的关系都很重要。

页岩是富含黏土的岩层,这些黏土通常来自细粒沉积物,沉积于海底或湖底比较平静的水体环境中,并且埋藏了数百万年。页岩地层可以充当盆地中的压力阻层,顶部封盖层或者页岩气区带的储层。更专业地讲,页岩就是以粉砂级和黏土级颗粒为主、易剥裂的陆源沉积岩。在这个定义中,“易剥离”是指页岩沿着层面剥裂为薄片的能力,“陆源”是指沉积物的来源。在很多盆地中含水体的流体压力会明显增大,这导致水力裂缝的形成和流体的排出,但是在大部分盆地中不可能出现天然水力裂缝。

页岩是一种主要由固结的黏土级颗粒组成的沉积岩。页岩地层是在低能水体环境中以泥的形式沉积的,比如在潮坪和深水盆地中,细粒黏土在静水中从悬浮状态沉淀下来。在这些极细沉积物沉积的同时,还聚集了藻类、植物和动物的有机质碎屑。极细粒的片状黏土颗粒和纹层状沉积物使页岩具有一定的水平渗透率和非常有限的垂向渗透

率。低渗透率意味着页岩中圈住的天然气除非经过很长的地质时期，否则无法在岩石中轻易运动（数百万年）。页岩地层单元通常富含有机质，因此它被认为是沉积盆地中产油气的烃源岩。

页岩主要由黏土矿物组成，如伊利石、高岭石、蒙脱石等。除此之外，页岩通常还含有其他黏土级的矿物颗粒，如石英、燧石和长石。页岩可能还会有其他一些矿物成分，包括有机质颗粒、碳酸盐、铁氧化物、硫化物和重矿物等，这些矿物在页岩中出现与否取决于沉积环境。

根据有机质含量可以把页岩分为暗色页岩和浅色页岩两大类。暗色或黑色页岩富含有机质，而颜色较浅的页岩有机质含量较少。富含有机质的页岩是在少氧或无氧的水体中沉积的，这就避免了有机质腐烂。有机质主要是随沉积物堆积的碎屑。

1.1.2 页岩气

从页岩的定义来看，页岩气就是赋存在富含有机质细粒沉积岩中（页岩及相关岩性）的烃类气体。页岩所生成的天然气以吸附气（有机质表面上）和游离气（裂缝和孔隙内）的方式赋存在页岩中，因此，页岩气是自生自储型气（藏）。低渗透的页岩需要有大量的裂缝才能生产出具有商业价值的天然气。

根据化学组成，页岩气通常是以甲烷（60%~95%）为主要组分的干气，但是也有些页岩地层产湿气。安特里姆（Antrim）和新奥尔巴尼（New Albany）页岩区带一般同时产出水和天然气。含气页岩地层富含有机质，在以往的陆相天然气开发中，含气页岩地层曾被视为传统的砂岩气藏和碳酸盐岩气藏中的烃源岩和盖层。

页岩中的天然气有两种不同的成因，但也可能存在混合成因气：①有机质热解或者石油二次裂解产生的热成因气；②生物气，比如密歇根（Michigan）盆地的 Antrim 页岩气，就是由淡水补给区的微生物产生的。热成因气与经历较高温度和压力的成熟有机质有关。总体而言，在其他条件都相同的情况下，成熟度较高的有机质的生气量要高于成熟度较低的有机质。有机质成熟度通常用镜质组反射率（ R^0 , %）来表示。当镜质组反射率超过 1.1% 时，有机质已经达到足够高的成熟度，它可以作为有效的烃源岩生成天然气。

对于裂缝比较发育的页岩，如果含有大量的成熟有机质而且埋深较大或具有比较高的压力，那么其初始天然气产量就会比较高。例如，巴尼特（Barnett）的水平井有较高的初始储层压力，压裂后初始产量可达每日几百万立方英尺^①。但是，开采一年后，气流主要受控于天然气从基质到水力裂缝的扩散速率。

页岩气不同于常规气藏的是，页岩既是生气的烃源岩，又是赋存天然气的储层。页岩的低渗透率具有捕获天然气的能力，并且阻止其往地表运移。天然气可以保存在天然裂缝和孔隙中，或者吸附在有机质的表面。随着钻井和完井技术的进步，这些天然气可以实现经济开采，北美的很多盆地都已经证实了这一点。

1.2 页岩气的评价

页岩气区带的4个重要特征包括：①热成熟度；②储层中所生成并赋存的天然气类型——生物成因气或热成因气；③地层的总有机碳含量（TOC）；④储层渗透率。

“岩石的热成熟度”是指岩石中所含有机物质随时间逐渐升温并被转化为液态或气态烃类的程度。TOC是指岩石中所含的有机质总量，用质量百分比表示。通常有机碳含量越高，生烃潜力越大。

页岩的含气性与常规储层不同，除了与常规储层一样可以赋存在孔隙系统之外，页岩气还可以吸附在有机质表面。基质孔隙中的游离气体和吸附气各自对生产的贡献及共同的贡献都是决定页岩气井产量曲线的关键因素。

页岩中所赋存的天然气总量及其分布取决于多种因素，其中包括初始储层压力、岩石物性和吸附性。页岩气生产过程中有3个主要的阶段。最初开采的天然气以裂缝网络中赋存的游离气为主。但游离气产量会因裂缝存储能力有限而快速下降。当初始产量递减速度稳定后，页岩气开采转变为以基质孔隙中赋存的游离气为主。基质中蕴藏的天然气量取决于页岩层的具体性质，而这种性质是难以评价的。此后，页岩气开采就以解吸的天然气为主，随着储层压力下降，吸附气就会从页岩中释放出来。在解吸附过程中，天然气的产量取决于储层压力是否发生明显的下降。

要把页岩气年产量维持在一定的水平，天然气必须从低渗的基质扩散到诱导裂缝或者天然裂缝中。一般而言，基质渗透率越高，扩散到裂缝中的速度越快，流到井筒的速度也越快。另外，裂缝发育程度比较高的页岩（即裂缝间距较短），在基质渗透率足够高的情况下，就会有比较高的页岩气产量、较高的采收率和较大的泄气面积。此外，页岩基质中的微裂缝对页岩气开采很重要，但是这些微裂缝很难识别，只有通过深入的研究和分析才能确定它们在页岩气开发中所发挥的作用。

与常规天然气藏的高采收率（50%~90%）相比，页岩气的采收率要低得多（5%~20%），但天然裂缝发育的Antrim页岩的采收率可达50%~60%。近年来，路易斯安那州海因斯韦尔页岩气的采收率可能高达30%。对于低渗透率页岩气而言，钻井和完井技术创新是提高采收率最重要的途径。在开发的初始阶段，经常找渗透率的“甜点”（sweet spots），因为甜点的日产量和采收率都要高于渗透率较低的页岩。

1.3 美国页岩气开发历程

有大量外文文献报道了美国页岩气开发历程，国内李大荣也翻译过相关文献。美国的页岩气资源量十分丰富，并且在全国各地广泛连续性分布。在美国本土48个州中，目前所估算的页岩气技术可采总量为 $482 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。相对而言，美国东北部的页岩气资源量最大，占全国页岩气总量的63%，其次是墨西哥湾地区，占比为13%，西南部页岩气资源量占比为10%。在美国，页岩气资源量最大的3个页岩气区带是：Marcellus页岩（页岩气技术可采资源量为 $141 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ）、Haynesville页岩（页岩气技术可采资源量为 $74.7 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ）

和 Barnett 页岩（技术可采资源量为 $43.4 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ）。页岩气区带的大规模开发，使得美国页岩气产量出现了大幅度提高，2000 年产气量为 $0.388 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ，到 2010 年，产气量上升到 $4.944 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。随着后续的大规模开发，页岩气所呈现出来的巨大潜力，将会改变美国的能源结构和消费市场。按照目前北美地区的天然气消费能力，或者按照更高的消费能力来计算的话，北美地区的巨大页岩气资源量将能满足美国未来 50 年甚至更长时间的天然气消费需求。

在 1627 ~ 1669 年，法国的地球勘探人员曾经对美国的阿巴拉契亚（Appalachians）盆地富含有机质的黑色页岩进行过描述，当时那些地球勘探人员所提到的油气实际上就是现在位于纽约西部的泥盆系页岩中的油气。在 1821 年，William Hart 在纽约州肖陶扩（Chautauqua）县佛里多尼亚（Fredonia）镇的气体渗漏带附近钻了北美第一口页岩气井，该井用来开采泥盆系的 Dunkirk 黑色页岩中的天然气，并将采出的天然气输送给 Fredonia 镇，天然气主要用于燃烧照明。实际上该井比宾夕法尼亚州石油小溪的德雷克油井早了 35 年，这种页岩气的开发为美国开创了一个全新的时代。

Peebles 在 1980 年对这段历史留下了文字记录，在靠近 Canadaway 河流的地方，一群小孩意外地引燃了天然气气苗，从而使当地居民发现了这种“可以燃烧的泉水”的潜在价值。人们先是钻了一口 8.23m 深的井，并在其中的页岩层中获得了天然气，他们利用空心圆木管将井中的天然气输送到附近的居民用来夜晚照明。后来，那些空心圆木管被换成了 William Hart 制造的厚 19.05mm 的铅管。William Hart 把地层 7.62m 深处的天然气存进一个倒置的装满水的大水槽中（相当于储气罐的功能），并在水槽与 Abel House 旅馆之间铺设了管线。在 1825 年 12 月，据 Fredonia 镇的新闻发言人所说，在 12 月 31 日晚上人们可以看到由储气罐供给天然气而点燃的 66 个漂亮的煤气灯和 150 个照明灯，其他的储气罐也有充足的天然气供应。当时，Fredonia 镇上的天然气供给和消费情况在全世界都是前所未有的。值得指出的是，实际上，这口深 8.23m 的浅井就是一口页岩气井，而天然气产自泥盆系 Dunkirk 页岩。

在 19 世纪 70 年代，美国的页岩气开发沿西部逐步扩展到伊利（Erie）湖南岸和俄亥俄州东北部地区。在 1863 年，在伊利诺伊（Illinois）盆地肯塔基州西部泥盆系和密西西比系黑色页岩中相继发现了页岩气。20 世纪 20 年代，页岩气钻井已发展到西弗吉尼亚州西部、肯塔基州、印第安纳州等地区。在 1926 年，阿巴拉契亚盆地肯塔基州东部和西弗吉尼亚州的泥盆系页岩气已经开始商业化生产，成为了当时世界上最大的天然气田。

1973 年阿以战争期间的石油禁运和 1976 ~ 1977 年的第一次石油危机，进一步促使美国能源部（DOE）加快了天然气勘探研究的步伐。在 1976 年，美国能源部及能源研究和开发署联合了美国地质调查局（USGS）、州级地质调查所、大学以及工业团体，发起并实施了针对页岩气研究与开发的东部页岩气工程（EGSP），主要考察了阿巴拉契亚盆地、密歇根盆地和伊利诺伊盆地，目的是加强对页岩气的地质、地球化学、开发工程等方面的研究，以增加页岩气的产量同时获得一批科研成果，这项研究工作一直持续到 1992 年。从 1980 年开始，美国天然气研究所（GRI）组织力量对泥盆系和密西西比系页岩天然气的潜力、取心技术、套管井设计以及提高采收率等关键问题进行了深入研究，逐步构建了以岩心实验为基础、以测井定量解释为手段、以地震预测为方向，以储集层改造为重点、以经

济评价为主导的勘探开发体系。随后,页岩气勘探和研究工作迅速向其他地区展开,页岩气研究全面展开。

在1989~1999年,美国页岩气生产总体保持较高速度的增长,年产量翻了近两番,达到 $1.06 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。20世纪80年代投入运营的密歇根盆地泥盆系Antrim页岩到20世纪90年代已成为最具活力的页岩气产区。在2001年,美国能源信息署所列的12个大气田中,有8个属于非常规天然气田,福特沃斯(Fort Worth)盆地的纽瓦克(Newark)东部(Barnett组页岩)和密歇根盆地的Antrim页岩均在天然气田榜上。据统计,从20世纪早期到2000年,美国只在密歇根盆地(Antrim页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio页岩)、伊利诺伊盆地(New Albany页岩)、福特沃斯盆地(Barnett页岩)和圣胡安(San Juan)盆地(Lewis页岩)生产页岩气,页岩气井约28000口,页岩气产量仅为 $1.12 \times 10^{10} \text{ m}^3$,从事页岩气生产的公司仅有少数几家;但到2007年,美国已经在密歇根盆地(Antrim页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio页岩、Marcellus页岩)、伊利诺伊盆地(New Albany页岩)、福特沃斯盆地(Barnett页岩)、圣胡安盆地(Lewis页岩)、阿科马(Acoma)盆地(Woodford页岩、Fayetteville页岩)等20多个盆地发现并成功开发了页岩气,页岩气生产井增加到41726口,页岩气年产量接近 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$,从事页岩气生产的公司达60~70家。在2015年,美国页岩气产量已经达到 $2803 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在20世纪90年代后,天然气钻井公司开发出了用于开采页岩细小孔隙中的石油和天然气的新技术。这一技术进步很重要,因为它“解放”了世界上一批最大的天然气资源。在1990~2000年间,天然气工业已经发生了翻天覆地的变化,特别是技术的快速发展,已经使从致密的页岩地层中开发天然气成为现实。2000年以来,北美页岩气产量的快速增长已经极大地改变了全球的天然气市场格局。实际上,页岩气的出现可能是近年来全球能源市场最引人注目的发展和成果。

得克萨斯州的Barnett页岩气田是在页岩储层中开发的第一个大型天然气田。Barnett页岩气开采最早始于1981年,当时的米切尔能源开发公司(Mitchell Energy and Development Corporation)率先在福特沃斯(Fort Worth)盆地进行了页岩气开发。在Barnett页岩气成功投入开发后,人们仍认为页岩中具有比较发育的天然裂缝是页岩气开发的必要条件之一。现在低渗透的含气页岩区带被视为技术型的天然气区带。微地震裂缝成像、3D地震、水平钻井、水力压裂以及分段压裂等技术的进步,都为页岩气的成功开发做出了重要贡献。从Barnett页岩中开采天然气具有很大的挑战性,原因是页岩的孔隙空间太小,天然气难以穿越页岩流入井中。钻井公司发现以足够高的压力向井中注水可以使页岩破裂,从而增大其渗透率。这些裂缝可以“解放”部分孔隙中的天然气并使其流入井中(这就是水力压裂)。水平钻井和水力压裂技术引发了一场钻井技术革命,并为多个巨型页岩气田的开发铺平了道路和奠定了基础。这些气田包括阿巴拉契亚(Appalachians)盆地的Marcellus页岩、路易斯安那州的Haynesville页岩和阿肯色州的Marcellus Fayetteville页岩。这些巨大页岩储层中所蕴含的天然气能够满足美国20年以上的消费需求。在美国北部,从页岩中开采天然气已经有180年的历史了。在美国纽约州Fredonia镇的外围地区,最早在1821年,出于商业目的一直在钻探天然气井。密歇根盆地的Antrim页岩气的开发始于1936年,已有超过8000口页岩气生产井,其中大多数钻井钻于1987年以后。

Barnett 页岩，发现于 1981 年，也有近 8000 口页岩气生产井。图 1.1 是福特沃斯盆地中 Newark 区块 Barnett 页岩气的开发情况。

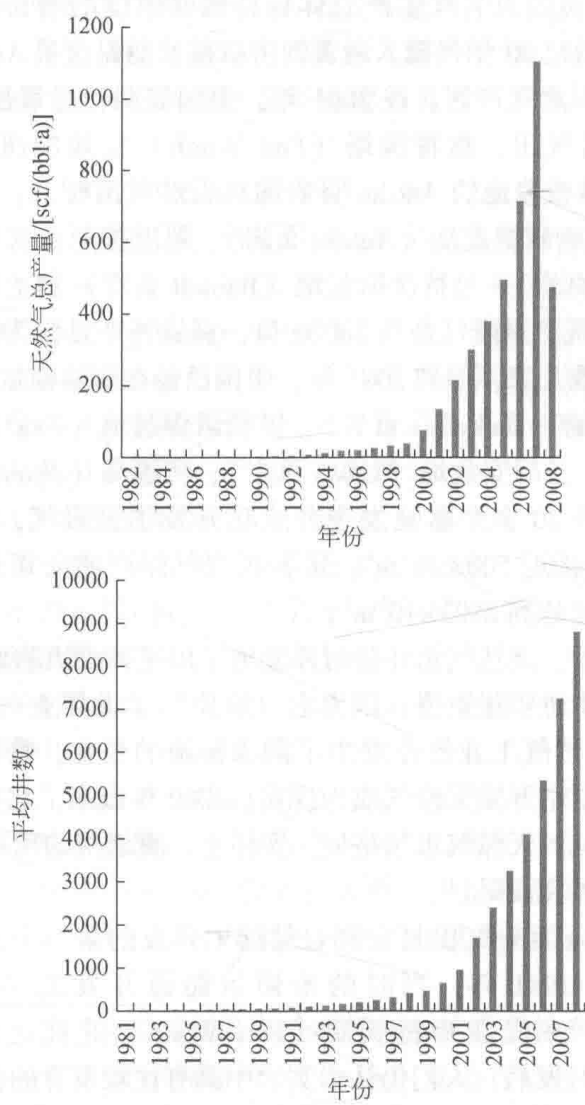


图 1.1 Barnett 页岩气区块年产气量和生产井数统计

在美国，天然气生产缓解了石油不足的巨大冲击，其中连续增长的页岩气产量起到了不可低估的作用。美国页岩气年产量的迅速增加进一步缓解了美国能源需求的压力。在 2008 年，美国石油对外依存度从 1977 年以来首次出现下降。在 2009 年，美国页岩气产量首度超过煤层气。据《纽约时报》2009 年 10 月 10 日的消息，美国页岩气年总产量超过 $900 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国天然气年总产量的 13%，页岩气开采技术的进步使美国的天然气探明储量增加了 40%。同时，为了减缓对俄罗斯天然气的依赖，西欧国家也积极开展了页岩气地质研究，希望借此改变世界的能源、经济以及政治格局。国际上，页岩气地质研究的热潮已经兴起，页岩气资源已经成为能源的新宠。

21 世纪初，已发现的主要页岩气资源区带包括：密歇根盆地北部的安特里姆页岩、得克萨斯州沃斯堡盆地的 Barnett 页岩、圣胡安盆地的 Lewis 页岩、伊利诺伊盆地的 New

Albang 页岩以及阿巴拉契亚盆地的 Ohio 页岩。后来又新发现的页岩气区带包括：俄克拉荷马州的 Woodford 页岩、阿肯色州的 Fayetteville 页岩、阿巴拉契亚盆地的 Marcellus 页岩、纽约州的 Utica 页岩以及得克萨斯州的 Eagle Ford 页岩。美国主要页岩气区块及分布特征见表 1.1。

表 1.1 美国主要页岩气区块及分布特征统计

名称	储层特征
Antrim 页岩	埋深一般在 500 ~ 2300ft，分布面积大约为 $3\times10^4\text{mi}^2$ ，其有机质含量最高可达 20%，主要由藻类物质组成。镜质组反射率为 0.4% ~ 0.6%，说明这套页岩还未达到热成熟。其埋藏比较浅
Bakken 页岩	分布在蒙大拿州和北达科他州威利斯顿（Wiuiston）盆地，它与其他页岩区带的不同之处在于，它是一套石油储层，为夹在顶、底页岩之间的白云岩，埋深为 8000 ~ 10000ft，不仅产石油，还产天然气和天然气液
Baxter 页岩	是富含石英或碳酸盐的粉砂岩。页岩的 TOC 含量为 0.5% ~ 2.5%，粉砂岩夹层的 TOC 含量为 0.25% ~ 0.75%。页岩和粉砂岩的实测孔隙度一般都在 3% ~ 6%，基质渗透率为 100 ~ 1500nD。在科罗拉多州西北部和相邻的怀俄明州的弗米利恩 Vermillion 盆地
Caney 页岩	位于俄克拉荷马州阿科马盆地，是福特沃斯盆地巴奈特页岩的同位地层，TOC 平均为 5% ~ 8%，而且与密度呈线性相关关系，估算的页岩气地质储量为 $300\times10^8 \sim 400\times10^8\text{ft}^3$
Chattanooga 页岩	被认为是一套富含石油的页岩地层，在黑勇士盆地的大部分地区，Chattanooga 页岩都处于生气窗内，因而页岩气资源潜力可能较大
Conasauga 页岩	集中在亚拉巴马州的东北部地区。除了埃托瓦（Etowah）县境内的一口页岩气井的 TOC 含量可达 3% 以上
Eagle Ford 页岩	是一套晚白垩世的沉积岩，由富有机质的海相页岩构成，在得克萨斯州南部的大部分地区都有分布，面积为 3000mi^2 。这套页岩在露头中也有出露，页岩的宽度大约为 50mi，平均厚度为 250ft，埋深为 4000 ~ 12000ft
Fayetteville 页岩	Fayetteville 页岩分布在阿科马盆地，钻遇深度在数百英尺到 7000ft
Floyd 页岩	是福特沃斯盆地高产的 Barnett 页岩的同位地层，Floyd 页岩的下段富含有机质，这段地层被非正规地称为 Neal 页岩，属于在盆地中沉积的富有机质页岩，被视为黑勇士（Blade Warrior）盆地中常规油气藏的主力烃源岩
Haynesville 页岩	分布在路易斯安那州北部和得克萨斯州东部的（North Louisiana）盐盆中，埋深为 10500 ~ 13500ft，面积大约为 9000mi^2 ，平均厚度为 200 ~ 300ft
Hermosa 页岩	由几乎等量的黏土颗粒级石英、白云石和其他碳酸盐矿物以及不等量的黏土矿物组成。黏土矿物黑色页岩层变少并减薄，而且没有岩盐层为其提供优质盖层
Lewis 页岩	是富含石英的泥岩，沉积环境为浅海，是在坎佩尼期西南向海退过程中沉积的，厚度为 1000 ~ 1500ft
Mancos 页岩	是新兴的页岩气区带，厚度比较大，在尤因塔盆地内平均厚度为 4000ft，分布在尤因塔（Uinta）盆地南部的 2/3 区域
Marcellus 页岩	又被称为马塞勒斯组，是一套黑色、低密度的中泥盆统钙质页岩，主要分布在俄亥俄州、西弗吉尼亚州、宾夕法尼亚州和纽约州，埋深为 4000 ~ 8500ft
Neal 页岩	是上密西西比统弗洛伊德组中的一套富含有机质页岩。Neal 页岩长期被视为黑勇士盆地常规砂岩油气藏的主力烃源岩，主要分布在黑勇士盆地的西南部地区

续表

名称	储层特征
New Albany 页岩	是富有机质的页岩，在印第安纳州和伊利诺伊州南部以及肯塔基州北部的广大区域都有分布，产层段的埋深为 500 ~ 2000ft，厚度大约为 100ft。这套页岩自上而下大体上可以划分为 4 个地层段
Niobrara 页岩	分布在科罗拉多州东北部、堪萨斯州西北部、内布拉斯加州西南部和怀俄明州东南部，在埋深 3000 ~ 14000ft 的地层中发现有油气
Ohio 页岩	这个页岩气区带从田纳西州中部一直延伸到纽约州的西南部，而且还包括 Marcellus 页岩。中、上泥盆统页岩地层的分布面积大约为 $12.8 \times 10^8 \text{ mi}^2$ ，这套地层的厚度在 5000ft 以上，富含有机质页岩的净厚度超过了 5000ft
皮尔索尔页岩	位于 Eagle Ford 页岩之下，埋深为 7000 ~ 12000ft，厚度为 600 ~ 900ft
Pierre 页岩	分布在科罗拉多州的 Pierre 页岩在 2008 年产出了 $200 \times 10^4 \text{ ft}^3$ 的天然气。这套页岩的埋深为 2500 ~ 5000ft
Utah 页岩	有 5 个富含有机质的层段，具有相当大的页岩气商业开发潜力：犹他州东北部 Mancos 页岩的 4 个地层段——普雷里（Prairie）峡谷段、Juana Lopez 段、Lower Blue Gate 段和 Tununk 段，以及犹他州东南部 Hermosa 群中的黑色页岩
Utica 页岩	发育在 Marcellus 页岩之下 4000 ~ 14000ft 的深处，有成为大型页岩气区带的潜力，埋深较大，在纽约州、宾夕法尼亚州、西弗吉尼亚州、马里兰州甚至弗吉尼亚州都有分布，页岩气资源量在 $2 \times 10^{12} \sim 69 \times 10^{12} \text{ ft}^3$
Woodford 页岩	位于俄克拉荷马州的中南部地区，埋深在 6000 ~ 11000ft，这套页岩地层的年代为泥盆纪，面积近 11000 km^2

1.4 加拿大页岩气开发历程

加拿大是继美国之后第二个成功开发页岩气的国家。加拿大非常规天然气协会（CSUG）评价结果显示，加拿大页岩气资源量超过 42.5 万亿 m^3 。2011 年美国能源信息署报告显示，加拿大页岩气可采储量为 10.99 万亿 m^3 ，位居世界第 7。

孟浩（2014）系统归纳总结了加拿大页岩气开发历程。2000 ~ 2001 年，不列颠哥伦比亚省三叠系的 Upper Montney 页岩气开始商业性生产。2007 年加拿大第一个商业性页岩气（藏）在不列颠哥伦比亚省东北部投入开发。

加拿大能源公司 Encana 是加拿大页岩气的主要开发企业，业务集中在加拿大西部，与中国石油天然气集团有限公司、日本三菱商事株式会社有页岩气合作开发业务。

加拿大页岩气开发技术源自国外引进及国内研发。加拿大页岩气主要分布在西部，与美国西部页岩气地质结构类似，因此，包括水平井钻井、水力压裂、微地震裂缝监测等技术在美 国试验成功后被引入加拿大以用于页岩气开发。加拿大国内研发是通过资助国内研究机构、大学、私人石油公司等开展技术研发，获得技术突破。

加拿大为页岩气开发商提供优惠政策。例如，对投资人当年投入资金减免税率 100%，生产期间也进行一定减税，最高减免额度为项目当年缴纳税额的 30%。

第2章 页岩气压前评价技术

页岩气储层非均质性强，不同的区块相差较大，即使在同一口水平井内，不同的井段也具有不同的特征，因此，需要对页岩气进行针对性的评价才能采取相对应的压裂技术，以达到最佳的开发效果。针对页岩气的评价，主要有储层地质和构造特征、岩石物理和力学特性、地应力分布等。这些参数中，对压裂至关重要是岩石物理、力学特性以及地应力分布。本章将介绍相关评价技术。

2.1 页岩气地质储量

页岩气总的地质储量包含游离气和吸附气两部分。计算或预测储量的准确与否取决于页岩气有效孔隙度、储层厚度、含气面积和原始含气饱和度等参数的精度。页岩气地质储量的分类不同，其计算方法也不同，如图 2.1 所示，PRMS（Petroleum Resources Management System）分类方法为 2007 年 5 月 SPE、美国石油地质学家协会、世界石油理事会、石油评估工程师协会联合提出的方法。EIA 方法为美国能源署提出的方法。

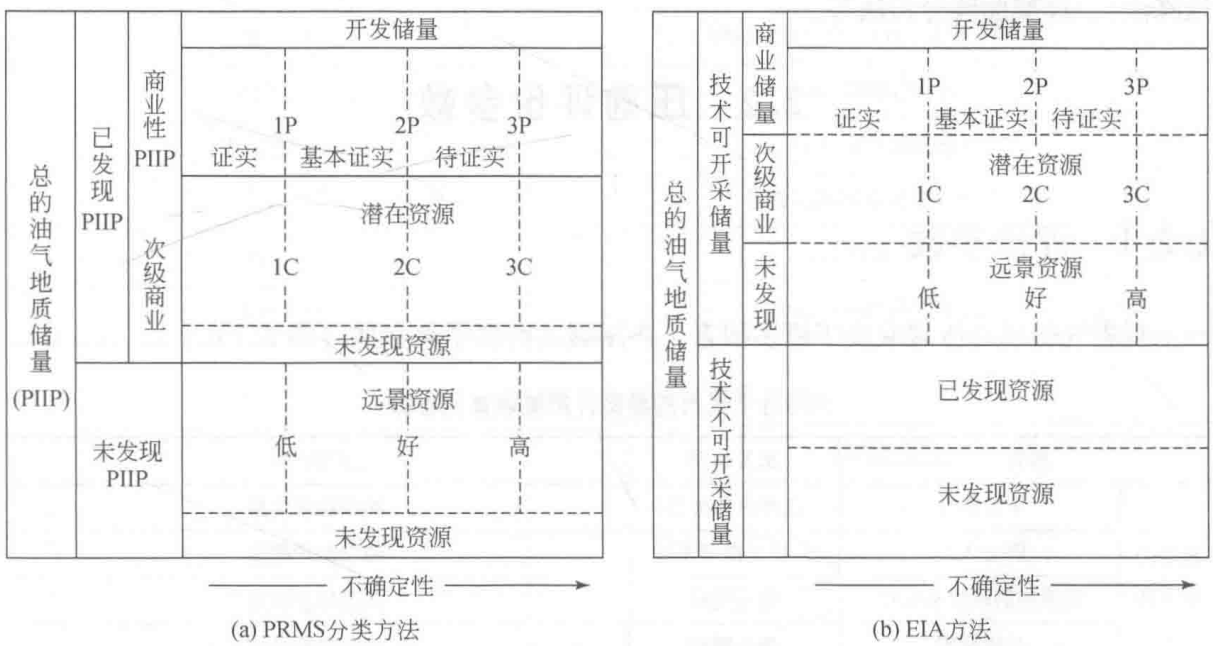


图 2.1 页岩气储量分类

PIIP：原地质储量；1P：探明储量；2P：探明储量+概算储量；3P：探明储量+概算储量+可能储量；
1C：低估算值；2C：最佳估算值；3C：高估算值

张金川等（2012）、徐美华等（2013）等归纳总结了页岩气储量计算方法：类比法、容积法（改进）以及动态法等。

(1) 类比法

在页岩气勘探初期，资料较少的情况下，可以使用该方法。该方法主要是与美国和加拿大典型页岩气产区的地质特征、储层物性、化学分析等方面作比较，对资源储量有一个大概判断。

(2) 容积法

容积法是计算页岩气储量最有效的方法，但所需资料较多。改进的容积法可以计算游离气的地质储量，提高页岩气静态地质储量计算精度。容积法计算页岩气游离气储量的公式如下：

$$G_t=A_g h \phi \left(1-S_w-S_0\right) \frac{T_{sc} Z_{sc} P_i}{P_{sc} T_i Z_i}$$

(2.1)

式中， A_g 为含气面积， m^2 ； S_0 为含油饱和度，无量纲； h 为气藏加权平均厚度， m ； S_w 为束缚水饱和度，无量纲； ϕ 为地层条件下实测孔隙度，无量纲； P_{sc} 为地面压力， MPa ； P_i 为地层压力， MPa ； T_i 为地层温度， K ； T_{sc} 为地面温度， K ； Z_{sc} 为地面条件下的气体偏差因子，无量纲； Z_i 为地层条件下的气体偏差因子，无量纲； G_t 为地面标准条件下游离气地质储量， m^3 。

(3) 动态法

动态法是利用气藏压力、产量等时间变化的生产动态资料计算储量的，适用于有足够压力和产量变化等生产数据的情况下，它通常包括压力/累计产量法、物质平衡法（也称压降法）、递减曲线分析法等。

2.2 压前评价参数

2.2.1 评价参数

页岩气的成功压裂取决于诸多因素，在压裂之前要了解参数（表 2.1）。

表 2.1 水力压裂设计所要收集的参数

参数		重要作用	取决于
地质力学方面	页岩脆性	选择流体类型	油层物理模型
	闭合压力	选择支撑剂类型	油层物理模型
	支撑剂的粒度和体积	避免脱砂	油层物理模型
	起裂位置	避免脱砂	油层物理模型
地球化学方面	矿物组分	选择液体	XRD(X 射线衍射)/TIBS (激光诱导击穿光谱)/油层物理模型
	水敏性	压裂液基液盐度	CST (毛细管渗吸时间) /BHN(硬度)/浸没试验
	必要时是否可以 使用酸	蚀刻所引发的问题	酸溶时间 (AST)
	支撑剂或页岩颗粒是否回流	生产问题	系统知识
	表面活性剂是否有益	导流能力的保持	流量测试

地质力学方面的参数可以通过地球物理分析得到，地质化学方面的参数可以通过室内岩心分析确定。只有了解这两方面的参数，压裂才能成功并获得较好的效果。

北美地区页岩气评价包含 17 个参数，主要包括页岩有效厚度、有机质丰度、热演化程度、矿物组成、含气量、孔隙度、渗透性、构造分布、沉积、构造演化史、页岩横向连续性、三维地震资料、地层压力特征、压裂用水、输气管网、井场情况与地貌环境、污水处理与环保。早期人们侧重于页岩本身品质的评价，后来的水资源、环保和输气管网的经济环保要求等已经成为重要的评价指标（贾长贵等，2012）。

表 2.2 总结了页岩气含气特征参数及参数获取来源。表 2.3 总结了确定页岩含气特征参数及相应的要求标准。

表 2.2 页岩含气特征参数及来源

储层特征	数据来源
弹性参数	岩心测试确定动态参数、静态测试
流体参数	测井、PVT、PDA 和压力梯度测试
裂缝闭合压力	瞬时停泵压力、小压和测井测试
自由气与吸附气	现场和室内解吸实验
成熟度	镜质组反射率、有机质评价
渗透率	瞬时停泵压力、PDA、NMR
孔隙压力	瞬时停泵压力、PDA 和测井测试
孔隙度	NMR 和测井测试
岩石组分	XRD 和电镜扫描
温度	压裂和瞬时停泵压力测试
TOC	岩石矿物评价
含水饱和度	岩心分析和测井测试

表 2.3 确定页岩含气特征参数及标准

参数	预期结果
失水影响	$S_w < 40\%$
深度	干气的最浅深度
裂缝类型	垂直和水平延伸方向 n
天然裂缝	张开还是充填硅质和钙质
天然气组分	CO_2 、 N_2 和 H_2S 的最低含量
含气孔隙度	$> 2\%$
含气类型	生物气、热成气还是混合类型