FUNDAMENTALS OF GAS SHALE RESERVOIRS

页岩气基础研究

〔澳〕Reza Rezaee 著　　董大忠 邱 振 等 译



科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

页岩气基础研究

〔澳〕Reza Rezaee 著

董大忠 邱 振 等 译



科学出版社

北京

图字：01-2016-8744 号

内 容 简 介

页岩气，产自富有机质页岩层系中天然气，是当今油气勘探与生产中增速最快的资源之一，受美国页岩气成功开发影响，全球页岩气勘探开发呈快速发展态势。本书介绍页岩气基础研究的相关热点问题，包括页岩气的分类、储量评估、流动机制、水力压裂、开发经济性评价、开发环境评价等；提供了页岩气勘探、开发及相关最优化设计等综合信息；同时也提出了目前页岩气商业化勘探开发所面临的挑战；除此之外，还介绍北美 Barnett、Haynesville、Marcellus 页岩等典型页岩气田的开发案例。

本书适合从事页岩气勘探与页岩气开发研究的科研工作者，以及油气工程专业的高等院校师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

页岩气基础研究 /（澳）雷扎 雷泽（Reza Rezaee）著；董大忠等译. —北京：科学出版社，2018.8

书名原文：Fundamentals of Gas Shale Reservoirs

ISBN 978-7-03-057761-0

Ⅰ. ①页… Ⅱ. ①雷… ②董… Ⅲ. ①油页岩资源-资源开发-研究 Ⅳ. ① TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 125081 号

责任编辑：焦 健 李 静 韩 鹏 / 责任校对：张小霞

责任印制：肖 兴 / 封面设计：北京图阅盛世

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

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张：33

字数：762 000

定价：298.00 元

（如有印刷质量问题，我社负责调换）

《页岩气基础研究》翻译审校委员会

主　任：邹才能

委　员：董大忠　邱　振　卢　斌　王社教　王玉满

于荣泽　郑德温　周尚文　张晨晨　冯子齐

张梦琪　蒋　珊　管全中　黄金亮　方朝合

葛志新

译者前言

美国页岩气开发取得全面成功后，借助水平井体积压裂、微地震监测、多井工厂化开采等核心技术，进一步推动致密油爆发式发展，非常规油气产量快速增长，在能源领域掀起了一场全球范围内的“页岩革命”。1981 年 Barnett 页岩气开发突破后，Haynesville、Marcellus 和 Utica 等一批页岩气相继开发，页岩孔隙中丰富的天然气资源被广泛认识，页岩气作为重要天然气资源日益受到重视。据国家油气重大专项《页岩气勘探开发关键技术》项目报告（2016），中国页岩气资源也很丰富，全国页岩气地质资源量 80.2 万亿 m^3，技术可采资源量 12.85 万亿 m^3。自 2005 年勘探开发以来，在四川盆地发现了涪陵页岩气田、长宁页岩气田、威远页岩气田和昭通页岩气田四个大型一超大型页岩气田，累计探明页岩气地质储量近 10500 亿 m^3，实现页岩气年产量 90 亿 m^3，成为北美之外最大的页岩气产区。

本书以页岩气基础研究为重点，涉及页岩气基础地质特征、测井与地震等勘探评价技术，也涉及页岩气气藏工程、全生命周期经济评价、面临环境问题与挑战等方方面面，内容丰富，论述翔实，对我国页岩气研究具有重要参考意义和指导价值。

本书由董大忠、邱振、卢斌、张晨晨、王社教、王玉满、管全中、黄金亮、方朝合、葛志新等翻译，于荣泽、周尚文、施振生、邵昭媛、雷丹凤、郑德温、郭为、张晓伟、郭伟、冯子齐、张梦琪、蒋珊、林长木等参与译校，董大忠、邱振全书审核统稿。

本书可供科研院所、高校、油气公司等从事页岩气勘探开发及相关研究人员参考。由于译者水平有限，时间仓促，译文中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

译　者

2017 年 12 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

从常规油气藏开采出来的油气资源正在迅速减少，而与此同时，全球能源消耗量正快速地增长，常规油气资源已经不能单独满足能源安全的需求。所以，迫切需要替代能源资源。就目前技术角度看，较昂贵但可持续的清洁能源资源还不能与相对便宜但不可再生的化石燃料相竞争。因此，应该从非常规油气资源中找到可替代的能源资源。这些非常规油气资源有多种形式，包括天然气水合物、油砂、油页岩、页岩油、致密砂岩气、煤层气，当然还有页岩气。在美国和其他一些国家，页岩气成为天然气勘探与生产的焦点已经有相当长的一段时间了。据美国能源信息署（EIA）的最新报告，在全球 41 个国家约 137 个盆地中估算页岩气技术可采资源量为 206.68 万亿 m^3。

自页岩气生产在美国取得显著成功以来，现在美国生产的页岩气已经比从常规气藏中生产出来的天然气要多，其他国家正在迎头追赶。正是如此，为了成功地勘探开发每一个页岩气远景区带，必须对许多重要因素给予考虑：

（1）为了正确评估和圈定沉积盆地页岩气甜点区，需要掌握相关页岩不同方面的知识，如有机地球化学、矿物学、岩石物理特性、岩石力学以及油藏工程等。

（2）页岩气开采的环境问题与挑战，包括高用水量需求、压裂液可能产生的污染风险，以及如何处理废弃物等。

出版本书的目的，是为页岩气远景区评价所涉及的主要因素提供一些指南。本书结构如下：

第 1 章　从页岩气在全球的重要性、分布和内在的挑战角度介绍页岩气。

第 2 章　讨论适合于富含有机质页岩沉积的环境。

第 3 章　评价页岩气资源系统的有机地球化学特征。

第 4 章　重点在于页岩层序地层学。

第 5 章　讨论用于评估页岩孔隙几何形状的方法。

第 6 章　详细介绍页岩气远景区带岩石物性分析步骤。

第 7 章　讨论用常规测井数据进行页岩孔隙压力评价。

第 8 章　涉及页岩（气）岩石力学。

第 9 章　讨论富有机质页岩的岩石物理特征。

第 10 章　介绍用于非常规油气资源开发的非人工震源的地震勘探方法。

第 11 章　讨论页岩中气体的传质过程。

第 12 章　综述有关页岩气藏气体储存和运移模拟的关键问题。

第 13 章　提供有关页岩储层性能分析方面的重要信息。

第 14 章　介绍确定页岩储层的原始天然气地质储量（OGIP）、技术可采储量（TRR）和采收率（RF）的方法。

第 15 章　讨论气体吸附的分子模拟方法。

第 16 章　涉及页岩气藏的润湿性问题。

第 17 章　总结页岩气在整个资产生命周期中会遇到的挑战。

第 18 章　介绍页岩气开发的环境问题和挑战。

在许多国家，页岩气远景区带的研究正在迅速推进，希望本书能够为这一主题提供一些有用的基础。

澳大利亚科廷大学石油工程系 Reza Rezaee 教授

2014 年 8 月 7 日

目　录

译者前言
前言
第 1 章　页岩气：全球意义、分布和挑战 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　页岩气概述 …… 1
1.3　页岩气的意义 …… 4
1.4　全球页岩气资源 …… 6
1.5　全球资源数据 …… 8
1.6　数据评估 …… 15
1.7　页岩气工业面临的挑战 …… 18
1.8　讨论 …… 20
1.9　结论 …… 20
附录 1.A　全球页岩气资源数据 …… 21
参考文献 …… 28
第 2 章　富有机质页岩沉积环境 …… 30
2.1　引言 …… 30
2.2　富有机质页岩沉积过程 …… 32
2.3　富有机质页岩地层分布 …… 35
2.4　富含有机质页岩的区域分布 …… 37
2.5　富有机质页岩沉积环境 …… 45
2.6　结论 …… 50
致谢 …… 51
参考文献 …… 51
第 3 章　非常规页岩气资源系统地球化学评价 …… 63
3.1　引言 …… 63
3.2　目的和背景 …… 65
3.3　干酪根的数量和质量 …… 66
3.4　样品的类型和品质 …… 68
3.5　干酪根的类型和组成产物 …… 69
3.6　热成熟度 …… 71
3.7　有机质孔隙的发育 …… 74
3.8　天然气含量 …… 75
3.9　石油的排出与滞留 …… 76
3.10　（石油的）二次裂解 …… 77
3.11　页岩气的成熟度上限 …… 77

3.12　气体组成和碳同位素 …… 78
3.13　页岩气资源系统评价的其他地球化学分析方法 …… 83
3.14　含页岩气的石油和凝析油 …… 84
3.15　主要的页岩气资源系统 …… 85
3.16　结论 …… 87
参考文献 …… 88
第 4 章　非常规页岩层序地层学 …… 94
4.1　引言 …… 94
4.2　层序地层模式 …… 94
4.3　海平面旋回年代学 …… 96
4.4　泥质搬运和沉积水深 …… 96
4.5　层序和体系域识别标准 …… 98
4.6　古生界页岩的实例 …… 98
4.7　中生界页岩的实例 …… 105
4.8　新生界页岩资源实例 …… 109
4.9　结论 …… 110
4.10　应用 …… 112
参考文献 …… 113
第 5 章　页岩气储层的孔隙表征 …… 117
5.1　引言 …… 117
5.2　样品特征 …… 119
5.3　实验方法 …… 120
5.4　PSD 实验方法的优点和缺点 …… 125
5.5　渗透率的测量 …… 126
5.6　结果 …… 127
5.7　讨论 …… 138
5.8　结论 …… 151
附录 5.A　X 射线衍射结果 …… 152
参考文献 …… 153
第 6 章　页岩气藏的岩石物理评价 …… 157
6.1　引言 …… 157
6.2　页岩气的主要性质评价 …… 157
6.3　页岩气藏的岩石物理测量 …… 161
6.4　页岩气藏的测井曲线分析 …… 166
术语 …… 179
参考文献 …… 180
第 7 章　测井数据预测页岩地层的孔隙压力 …… 186
7.1　引言 …… 186
7.2　超压机制 …… 188
7.3　超压估计方法 …… 195

7.4　构造活动对页岩孔隙压力的影响 202
7.5　讨论 215
7.6　结论 217
术语 217
参考文献 218
第 8 章　含气页岩地质力学 222
8.1　引言 222
8.2　含气页岩储层的力学性质 223
8.3　各向异性 229
8.4　含气页岩储层中的井壁失稳 231
致谢 242
参考文献 242
第 9 章　页岩储层的岩石物理分析 253
9.1　引言 253
9.2　页岩的实验室测量：可用数据集 254
9.3　有机质对弹性特征的影响 256
9.4　部分饱和的影响 259
9.5　成熟度的影响 261
9.6　富有机质页岩的地震响应 265
9.7　结论 267
参考文献 267
第 10 章　非常规资源开发的非人工震源地震勘探方法 272
10.1　引言 272
10.2　关于水力压裂的地质力学和天然裂缝基础知识 274
10.3　地震现象 279
10.4　微地震井下监测 283
10.5　使用地面或浅埋检波器组合来监测非人工震源地震信号 289
10.6　非人工震源地震数据的整合、解释和使用 306
10.7　结论 313
致谢 314
参考文献 314
第 11 章　天然气在页岩中的运移过程 320
11.1　引言 320
11.2　页岩样品中纳米孔的探测 322
11.3　微孔和纳米孔中的气流 324
11.4　页岩孔隙网络中的气流 328
11.5　页岩中的气体吸附 330
11.6　全干酪根中的扩散 331
11.7　气体分子扩散进入干酪根的测量 332
11.8　脉冲衰减法渗透率测量实验 333

11.9 粉碎样品实验 …… 339
11.10 金属罐解吸实验 …… 342
致谢 …… 344
参考文献 …… 344
第 12 章 页岩储层中模拟气体储存和运移的关键问题 …… 349
12.1 引言 …… 349
12.2 富有机质页岩储层微观几何形态 …… 350
12.3 气体储存机理 …… 351
12.4 流体运移 …… 354
12.5 毛管压力、平衡状态和增产改造用水的沉积 …… 357
12.6 纳米孔径多孔介质中流体特性及状态方程 …… 360
12.7 非均质页岩气储层粗化至大型均质模拟网格块 …… 363
12.8 最后备注 …… 366
参考文献 …… 367
第 13 章 非常规页岩储层生产动态分析 …… 372
13.1 引言 …… 372
13.2 页岩气藏的生产 …… 372
13.3 产量递减分析 …… 374
13.4 非常规油气藏产量和压力不稳定分析 …… 380
13.5 油气藏模拟 …… 385
13.6 特殊短期测试 …… 388
13.7 提高采收率 …… 392
13.8 结论 …… 393
致谢 …… 393
附录 13.A 黑油参数 …… 393
附录 13.B 凝析气压缩系数 …… 393
术语 …… 394
参考文献 …… 397
第 14 章 页岩气资源评价 …… 399
14.1 概论 …… 399
14.2 方法 …… 408
14.3 页岩气区资源评价 …… 409
14.4 讨论 …… 420
术语 …… 422
参考文献 …… 423
第 15 章 矿物和煤中气体吸附的分子模拟：页岩气藏中天然气赋存的意义 …… 426
15.1 引言 …… 426
15.2 矿物上气体吸附分子模拟 …… 429
15.3 结论 …… 440
致谢 …… 440

需要全本请访问 www.ertongbook.com

术语 …… 440
参考文献 …… 441
第 16 章　页岩气藏的润湿性 …… 445
16.1　引言 …… 445
16.2　润湿性 …… 445
16.3　含气页岩中的渗吸 …… 446
16.4　影响页岩吸水性的因素 …… 450
16.5　渗吸数据的定量解释 …… 458
16.6　油气田级盐水渗吸的估算 …… 461
16.7　含气页岩中的初始含水饱和度 …… 463
16.8　结论 …… 463
参考文献 …… 464
第 17 章　含气页岩在资产生命周期的挑战 …… 470
17.1　引言 …… 470
17.2　资产生命周期 …… 470
17.3　勘探阶段 …… 472
17.4　评估阶段 …… 474
17.5　开发阶段 …… 477
17.6　生产阶段讨论 …… 487
17.7　恢复阶段讨论 …… 488
17.8　结论——推荐做法 …… 488
致谢 …… 491
参考文献 …… 491
第 18 章　页岩气开发面临的环境问题和挑战 …… 495
18.1　引言 …… 495
18.2　水的使用 …… 495
18.3　压裂废水的处理和再利用 …… 496
18.4　地下水污染 …… 499
18.5　CH_4 排放 …… 501
18.6　其他气体排放 …… 503
18.7　对页岩气社区的社会影响 …… 503
18.8　诱发地震活动：废水注入和地震 …… 504
18.9　制度发展 …… 504
18.10　水力压裂化学用品的公开 …… 505
18.11　联邦政府层面 …… 506
18.12　结论 …… 508
参考文献 …… 508
延伸阅读 …… 511

第1章　页岩气：全球意义、分布和挑战

Reza Rezaee[1] 和 Mark Rothwell[2]
1　澳大利亚科廷大学石油工程系
2　澳大利亚 HSE 协助私人有限公司

1.1　引　　言

一般而言，评价一个页岩气远景区的主要地质特征，包括页岩的沉积环境、厚度、有机地球化学、热成熟度、矿物学和孔隙度。好的页岩气远景区具有较高的总有机碳（TOC）含量（>2%）、热成熟（R_o 为 1.1%～1.5%）、埋深浅（相同成熟度下）、黏土矿物含量低/脆性矿物含量高的特点。此外，孔隙度、原地应力状态、应力史和矿物学特征也是重要因素。

全球技术可采的（虽然不一定是经济可采的）页岩气资源很丰富，其地理区域分布也非常广，许多分布在能源消耗量较高的国家。因此，对于一些国家而言，页岩气具有降低能源价格和减少对其他国家能源依赖性的潜力，继而对政治和经济前景都有影响。然而，只有在目前缺少常规天然气生产、离需求中心较近（即人口中心）、还存在某些类型天然气输送基础设施的那些地区，页岩气勘探开发前景及重要性才更大。

“资源”的定义多种多样，本章采纳了“技术可采资源”（TRRS），其中包括经济资源和非经济资源。

对全球页岩数据的评价，包括对页岩沉积环境和盆地类型的确定。总结每个国家的页岩气远景区，提供对某种数据子集的统计评价，用来说明页岩气的位置以及预测的性质，如总有机碳、深度、地层年代和盆地类型等一些数据的统计评价。

页岩气生产行业面临着许多重大挑战，包括环境问题和商业挑战，涉及的关键问题包括水力压裂过程的管理、最终单井可采储量预测和提高，以及对不同地区生产成本的控制。

1.2　页岩气概述

简单地讲，页岩气是指从细粒的倾气性的沉积岩（即富有机质页岩）中产出的天然气（Lakatos and Szabo，2009）。鉴于常规天然气产生于粒状、多孔和渗透性的地层（即砂岩），在砂岩中，天然气很容易流动，我们将页岩气视为一种非常规的天然气资源。虽然页岩气被视为一种非常规油气资源，但其生产的天然气本质上与常规油气一样，都服务于相同的市场（Staff，2010）。因此，“非常规”这一术语仅仅指这种特定情况下生产天然气的岩

石。在常规天然气远景区，经常存在含气页岩[①]，但它是油气源岩而非油气储层。

传统意义上的页岩具有低渗透性的特点，往往作为常规天然气远景区中圈闭机理中的封盖性岩性，阻止油气聚集垂向逸出（Gluyas and Swarbrick，2009）。

一般地，全球油气估算总是在一定程度上反映了致密地层和页岩中的原地资源。然而，正是由于近期技术的相对发展和油价的升高才促使之前认为不具经济开发价值的资源现在成为具有经济潜力的巨大资源（Ridley，2011）。

有资料显示，页岩在世界各地分布非常广泛，大约在全球 142 个盆地中有 688 个页岩矿藏（Ridley，2011）。

1.2.1　页岩气地质

页岩气是从富有机质的细粒低渗透沉积岩，如页岩中产出的天然气。用常规远景区的相关术语来描述这些岩石，通常既是“烃源岩”，又是“储集岩”（US DOE，2009）。常规气和非常规气之间的关系如图 1.1 所示。

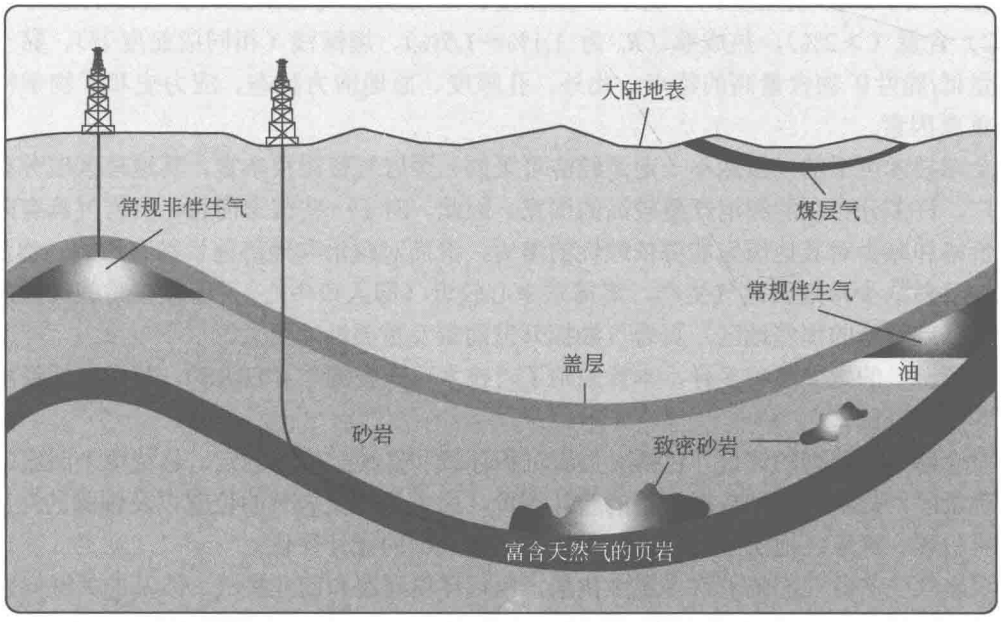


图 1.1　常规和非常规油气有关的基本地质原理地质剖面示意图（据 EIA，2010）

图中页岩气定义为“富含天然气的页岩”

从沉积环境来讲，含气页岩与常规页岩相似，如 Zou 等（2010）指出，富有机质页岩可以分为海相页岩、海陆过渡相煤系页岩及湖相页岩。沉积环境直接控制着页岩的主要特质，如有机地球化学指标、有机质丰度和岩石组成。根据 Potter 等（1980）的资料，保存在页岩中的有机质数量取决于水中溶解氧的水平。

页岩气有机地球化学指标随着沉积环境的变化而变化，类似于常规油气源岩的地球化学指标。海相页岩一般与Ⅱ型干酪根有关（即有机质与海相沉积物中膜状植物碎屑、浮游

① 本书中，“页岩气”为烃类化合物，而“含气页岩”是指页岩气远景区中开采页岩气的地质体。

植物和细菌微生物的混合物有关）。由于湖相页岩中的有机质与富含脂类有关（一般只出现在湖泊和潟湖环境），所以它们通常与Ⅰ型干酪根有关。此外，陆相/煤系页岩中的有机质与高等植物碎片有关，往往发育在成煤环境中，如三角洲顶端，所以它为典型的Ⅲ型干酪根（Gluyas and Swarbrick，2009）。

目的层总有机碳含量（TOC）（干酪根重量%）在某种程度上与影响采气量的厚度及其他因素有关。然而，Staff（2010）指出，对于商业页岩气生产，目的层总有机碳含量至少应为 3%，而 Lu 等（2012）指出，美国通常将总有机碳含量 2%作为大规模页岩气生产的下限，也就是说，任何一个页岩气远景区，总有机碳含量差异非常巨大。

经济含气页岩的厚度是众多需考虑的因素之一。举例来说，在北美，页岩气产层的有效厚度范围为 6m（Fayetteville）～304m（Marcellus）（Caineng et al.，2010）。Zou 等（2010）指出：经济远景区的指导厚度为 30～50m，其开发方式为连续开发，总有机碳含量（重量%）大于 2%。

总有机碳含量仅仅是评价页岩气潜力的一项指标。实际上页岩中要聚集有机质生成的天然气首先要求有机质能够生气。页岩气远景区中生气程度取决于页岩热成熟度（Lu et al.，2012）。通常只有在镜质组反射率（R_o）超过 0.7%（Ⅲ型干酪根）～1.1%（Ⅰ型和Ⅱ型干酪根），才能产生大量的页岩气，相当于埋藏深度 3.5～4.2km（Gliiyas and Swarbrick，2009）。然而，最有利的生气阶段是镜质组反射率达到 1.1%～1.4%（Staff，2010）。

在评价含气页岩时，矿物学特征起到重要作用，因为它对压裂施工（亦称为水力压裂和压裂效果）有影响。就矿物学特征对压裂效果的响应而言，脆性矿物（即硅质和钙质矿物）有利于整个地层中裂缝的广泛发育。Zou 等（2010）指出，脆性矿物含量大于 40%是产生足够裂缝延伸的必要条件。另外，Lu 等（2012）指出，在美国的主要页岩气产区，脆性矿物含量一般大于 50%，黏土矿物含量小于 50%。简而言之，就是黏土矿物含量高会导致水力压裂的响应塑性更强，即页岩发生变形而不是破碎。页岩的矿物学特征及脆性矿物含量与沉积环境有关，如海洋环境沉积的页岩往往黏土矿物含量较低、脆性矿物含量较高（EIA，2011a）。值得注意的是，除其他因素外，页岩对压裂的敏感性还受到应力状态及地层超压程度的影响。

岩石物理特征不是本次研究的重点。但值得注意的是，孔隙度是一项重要的岩石物理特征，它会影响页岩中游离气的聚集量。Staff（2010）指出，孔隙度大于 5%比较好，美国主要产气页岩孔隙度为 2%～10%。

1.2.2　页岩气远景区特点

含气页岩的基本地质特征决定了页岩气商业开发的总体框架。下文概括的页岩气开发的部分特征，可以较清晰地描绘页岩气开发过程，以及如何与常规天然气远景区分开来。

页岩气陆上开发是目前唯一可行的开发途径，因为海上钻井成本较高，海上钻井的日费比陆上钻井日费高一个数量级，陆上开发可以降低在近海环境大量钻井所需的成本。

页岩气井一般采用水平井钻井，以便使“储集层”最大限度地暴露。当然，在页岩层段非常厚的情况下也可以钻直井。

页岩气开发广泛采用水力压裂以增大渗透率、提高产量。通常采用多级分段压裂，每个压裂阶段单独进行施工，以使压裂过程的控制和效果最大化。通常每次压裂改造不仅保

持井下压力足够大，实现整个改造段储层增产（US DOE，2009），还可能使最敏感区域的裂缝集中发育。每次施工涉及一系列的分段，每段采用不同体积和成分的压裂液（US DOE，2009），如可能采用如下分段程序：

（1）试压阶段，确定井内套管和水泥的完整性。

（2）酸洗阶段，向井眼泵送酸液，清洗“损害”的井壁。

（3）注入滑溜水垫液，向地层中泵送水基压裂液与降阻剂的混合液，其实质是改善后续阶段压裂施工的效果。

（4）支撑剂阶段，将大量的压裂液与细粒度砂（支撑剂）的混合液分许多连续的子阶段注入地层，在每个后续的子阶段逐渐降低水与砂的比例，并增大砂的粒径。压裂混合液一般为99.5%的水和砂，其他成分为添加剂，用于提高压裂液性能。

需要大量钻井才能实现页岩气经济产量。在美国，不同页岩气远景区生产 1Tcf（1Tcf = 283.17 亿 m^3）的页岩气所需的钻井数差异很大（Kennedy，2010），平均每 1Tcf 所需钻井数为 200～250 口，每口井的最终可采储量（EUR/井）相当于 5Bcf/井（1Bcf=0.28 亿 m^3）。但是，其他资料（EIA，2011a）认为平均单井最终可采储量只有 0.29 亿 m^3。将页岩气开发与常规气开发相比，估算 Gorgon/Jansz-lo 气田的最终可采储量为 212.38 亿 m^3（Chevron，2012）。页岩气远景区开发经济风险仍然是主要原因，在气田开发的早期，单井最终可采储量约束较差（Weijermars，2013）。由于需要大量钻井，也就需要大量基础设施将天然气运送到处理站。

1.3　页岩气的意义

根据美国能源信息署（EIA，2011b）列出的国家名单，估算的页岩气技术可采资源为 186.89 万亿 m^3（表 1.1）。与全球探明天然气总储量约 169.90 万亿 m^3 相比，可知页岩气是潜力更大的天然气资源，能够使全球范围内许多国家的天然气资源潜力大幅度增加。表 1.1 对许多主要国家的现有探明天然气储量和页岩气技术可采资源量做出了详细说明。

表 1.1　各国天然气产量、进（出）口量和页岩气资源量

国家		2009 年天然气市场（折干计算）			页岩气技术可采资源/万亿 ft^3
		产量/万亿 ft^3[①]	消费量/万亿 ft^3	进口（出口）/%	
欧洲	法国	0.03	1.73	98	180
	德国	0.51	3.27	84	8
	荷兰	2.79	1.72	（62）	17
	挪威	3.65	0.16	（2156）	83
	英国	2.09	3.11	33	20
	丹麦	0.30	0.16	（91）	23
	瑞士	—	0.04	100	41
	波兰	0.21	0.58	64	187

续表

国家		2009 年天然气市场（折干计算）			页岩气技术可采资源/万亿 ft^3
		产量/万亿 $ft^3$①	消费量/万亿 ft^3	进口（出口）/%	
欧洲	土耳其	0.03	1.24	98	15
	乌拉圭	0.72	1.56	54	42
	立陶宛	—	0.10	100	4
	其他	0.48	0.95	50	9
北美洲	美国	20.6	22.8	10	862
	加拿大	5.63	3.01	（87）	388
	墨西哥	1.77	2.15	18	681
亚洲	中国	2.93	3.08	5	1275
	印度	1.43	1.87	24	63
	巴基斯坦	1.36	1.36	—	51
大洋洲	澳大利亚	1.67	1.09	（52）	396
非洲	南非	0.07	0.19	63	485
	利比亚	0.56	0.21	（165）	290
	突尼斯	0.13	0.17	26	18
	阿尔及利亚	2.88	1.02	（183）	231
	摩洛哥	0.00	0.02	90	11
	西撒哈拉	—	—	—	7
	毛里塔尼亚	—	—	—	0
南美洲	委内瑞拉	0.65	0.71	9	11
	哥伦比亚	0.37	0.31	（21）	19
	阿根廷	1.46	1.52	4	774
	巴西	0.36	0.66	45	226
	智利	0.05	0.10	52	64
	乌拉圭	—	0.00	100	21
	巴拉圭	—	—	—	62
	玻利维亚	0.45	0.10	（346）	48
以上地区合计		53.1	55.0	（3）	6622
世界合计		106.5	106.7	0	

注：①$1ft^3=2.831685\times10^{-2}m^3$；据美国能源信息署（EIA）资料修正（2011 年）。

需要全本请访问 www.ertongbook.com