

Exploration and Development for
Unconventional Hydrocarbons

非常规油气资源勘探开发

傅成玉◎编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

P618.130
57

非常规油气资源勘探开发

傅成玉 编著



中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气资源勘探开发 / 傅成玉编著.
—北京: 中国石化出版社, 2015. 12
ISBN 978 - 7 - 5114 - 3301 - 5

I. ①非… II. ①傅… III. ①油气勘探 - 研究 ②油气
开发 - 研究 IV. ①P618. 130. 8 ②TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 289656 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印制

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 36.75 印张 930 千字
2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
定价: 168.00 元

前 言

非常规油气勘探开发历史久远。从早期在油页岩中提取石油，到后来的致密油气开发，在不同国家的不同历史时期都曾经是石油勘探开发活动的一部分。到 20 世纪末，以加拿大为代表的油砂开发活动成为那个时期非常规石油开发的主角。很多大国际石油公司 (IOCs) 和国家石油公司 (NOCs) 争相收购油砂资源，并视其为未来全球石油产量增长的重要来源。曾几何时，油砂价格急剧上涨，居高不下，成为那个时期与石油价格暴涨相伴的又一道风景。随着页岩油气开发技术的突破，并在美国得到大规模应用，不仅使页岩油气开发成为当今非常规油气开发的绝对主力，并且为全球石油工业带来一场深刻革命，已经并将继续对全球政治经济产生重要影响。

(一)

美国从事页岩油气勘探开发研究探索已有近 40 年历史。然而其核心开发技术，即水平井分段压裂技术的突破是在 2005 年前后实现的。那时美国的主要石油公司开始逐步从国际市场收缩，回归本土并大举投资页岩油气开发。到 2008 年，美国本土的页岩油气开发活动成为当期全球石油勘探开发活动中最活跃最重要的力量，美国也成为当期全球油气产量增加最快的国家。短短几年美国页岩油气产量实现了“井喷式”增长。截至 2014 年年底，美国非常规石油产量达 1.87 亿 t，占其全部石油产量的 48.5%，非常规天然气产量 5284 亿 m³，占其天然气总产量的 73% (EIA, 2015)。

油气产量在短期内大幅增长改变了美国的能源结构，大大提升了美国自身油气供给能力，促进了产业结构的调整，推动了美国经济走向复苏。首先，美国页岩油气大规模开发上产带动了大规模投资，拉动了就业。当就业成为美国当年从政界到商界的共同焦虑时，页岩油气开发成为拉动美国就业的一道亮丽风景线。油气产量的大幅增长使美国的能源价格大大低于国际价格平均水平。在国际市场上历来美国 WTI 原油价格与北海 Brent 原油价格差一般都在每桶 2 美元左右，而在美国页岩油气大规模生产后，WTI 与 Brent 油价差曾一度扩大到每桶 15 美元左右。美国多年来一直享受较低的油价，这使美国炼化工厂开工率由

本世纪初的60%左右提升到2013年的93%。同样，天然气价格也一路下跌，由之前的5~7美元每百万英热单位降至3美元左右每百万英热单位。能源成本下降推动了美国经济整体成本的降低，提升了美国本土产业竞争力。

其次，天然气价格的降低使以天然气为原料的化工制造业加快回归本土，使美国再次成为化工制造业强国，同时推动了相关制造业向美国聚集，使美国向奥巴马总统提出的再工业化目标又前进了一步。国际货币基金组织数据显示2014年美国国内经济增长为2.43% (IMF, 2015)，远高其2008年金融危机的-0.29%水平，也大大好于其他发达国家增长水平。可以说页岩油气的开发对推动美国经济走出危机，实现缓慢复苏居功至伟。

据报道，未来10~15年，非常规油气资源仍将继续拉动美国经济增长。麦肯锡预测，至2020年，页岩油气开发将为美国国内生产总值贡献3800亿~6900亿美元，帮助其实现2%~4%的经济增长，并制造170万个永久性的就业机会。IHS公司《美国新能源的未来》报告中预测页岩油气开发可持续带动美国制造业复兴，至2025年将为其国内生产总值贡献5330亿美元并创造390万个工作岗位。

廉价天然气的大量生产使以煤为主的发电被天然气发电逐步取代，美国的煤矿业遭遇灭顶之灾。但影响不仅局限于美国，全球煤炭价格大幅下跌。十年前，人们还普遍认为全球煤炭价格将居高不下，成为部分替代石油的有力竞争者，仅仅几年时间，由于煤价跳水式的下跌使全球煤矿业进入冰河期。美国页岩气开发实质上推动了全球能源结构的调整。历史上曾经拒绝在《京都议定书》上签字的美国，近年来突然异常积极活跃地推动全球应对气候变化的政府间谈判。2015年12月12日，近200个联合国气候变化公约组织缔约方一致签署了《巴黎协议》，中美两国的推动是关键。而美国如此积极的背后是近年来页岩气的大规模利用，且未来还将扩大利用，使美国预期的减碳成本大大降低，既能实现经济发展又能实现低成本减碳。

美国页岩油气的成功开发不仅对全球的石油工业带来根本性、革命性的变革，也对地缘政治产生深刻影响。

首先，页岩油气开发技术的突破使全球可开发的油气资源大幅增加，全球仅页岩气资源量增加100万亿~200万亿 m^3 ，使曾经一度盛行的石油顶峰论销声匿迹。

第二，全球油气生产中心向大西洋转移，以往以中东为主的生产供应中心转移至美洲，使美洲成为油气生产的新中心，导致全球油气供给的空间分布结构发生重大变化。

第三，由于页岩油气产量的快速提升使美国在短短几年成为基本可以实现油气自给的国家，这不仅对美国自身是个巨大的改变，也大大提升了全球油气

供给能力。在全球经济不景气，对油气需求乏力的情况下，国际油价从2014年的每桶105美元跌至2015年的35美元。以沙特为代表的中东石油生产国和OPEC组织拒绝限产保油价，其真正原因是想用低油价迫使成本相对较高的页岩油气开发退出市场，从这两年的实际情况看，这个目标是不容易实现的。低油价将是未来几年的常态。长远看，只要页岩油气保持规模性开发和美元保持坚挺，油价很难回到每桶100美元高位。

第四，页岩油气开发改变了美国能源政策，必将对地缘政治产生重要影响。20世纪末，为了进口天然气，美国政府批准了在沿海城市建设LNG接收站项目，随着页岩油气的开发，美国不仅不需要进口LNG，还能出口，因此接收站项目改造为天然气的液化站用于出口，并且除了改造的项目外，还要批准建设新的LNG出口项目，从而拉低了全球LNG市场价格。2015年年底美国国会取消了已经实行40年的限制石油出口的法令。这是一个重大变化，也是一个重要信号。控制世界石油资源，确保石油市场秩序是美国外交的重要组成部分。这是美国自身利益的需要。当美国基本实现油气自给自足后还会花那么大的财力、物力和军力去维护石油市场秩序及其正常运行吗？“阿拉伯之春”似乎让人们听到了弦外之音。由此引发的地缘政治变化还将在未来的岁月中不断演进。

(二)

美国页岩油气的成功开发，引起了世界各国的高度关注。各国政府都试图搞明白页岩油气在本国的潜力及开发的可能性。经过几年的评估和认识，人们基本趋于认为除北美的美国和加拿大外，从资源量上来讲，中国和南美洲特别是阿根廷最具有进行大规模页岩油气开发的可能性。

中国非常规油气资源特别是页岩气资源非常丰富。一些国际公司对我国页岩油气资源进行了评估，我国一些机构和学者也初步开展了全国范围内的页岩油气资源综合评价，尽管评估有较大差异，但结论都表明我国油气资源非常丰富，潜力巨大，具有良好的资源基础。

我国政府非常重视，大力支持非常规油气资源的勘探开发，先后出台了《煤层气(煤矿瓦斯)“十二五”规划》《页岩气发展规划2011~2015年》《页岩气产业政策》等积极引导我国非常规油气资源开发；出台支持煤层气、页岩气开发的价格激励政策；通过国家重点项目立项，支持企业建立专项重点实验室，为非常规油气资源开发创造了良好条件，使我国页岩气商业开发得以突破，使致密气、煤层气产量不断增长，使非常规天然气在我国天然气产量中占据重要位置。

中国石油化工集团公司能够在中国首个实现页岩气的突破，并使中国成为继美国和加拿大之后，第三个实现页岩气商业性开发的国家，有其必然性。

首先，中国石化在石油行业上游的油气勘探开发上先天不足。中国石化是以炼油化工下游业务为主的公司，油气勘探开发是其短板。20世纪90年代末，中国石油勘探开发和炼化工业进行重组，中国陆地上形成了两大石油公司，即中国石油和中国石化。

当时划拨给中国石化的陆地油田除胜利油田外，基本都是亏损的老油田，勘探余地和潜力都非常有限，在其他地区的剩余勘探区块面积也非常有限。为此，中国石化先后在新疆、四川、鄂尔多斯等盆地申请登记了一些勘探区块，但由于公司成立晚，区块登记晚，几乎所有登记的区块都位于非盆地中心的边缘地带，从常规油气勘探视角看，都属于来头不大、风险很高且难啃的硬骨头。

第二，独辟蹊径实现突破。由于存在先天不足，上游业务成为短板，因此中国石化把资源战略作为其核心战略，战术上则绕开国内陆相油气勘探的传统思维，独辟蹊径重新探索海相油气勘探之路。经过多年探索，终于发现了中国第一个海相大气田——普光气田，之后又在四川盆地、新疆塔里木盆地等发现并开发了一系列海相油气田。继陆相生油理论之后，发展和丰富了中国海相油气勘探开发理论和技术，圆了中国几代地质科学家的梦。这是中国石化为中国石油工业发展做出的第一个重要贡献。中国石化的第二个重要贡献则是页岩气的发现与成功开发。还是由于先天不足，迫使中国石化把发展天然气作为资源战略在国内的核心业务。早在2006年，中国石化石油勘探开发研究院就开展了《中国页岩气早期资源潜力分析》前瞻性研究工作，接下来的钻探工作作为后来的发现积累了经验，打下了基础。2011年我到中国石化后又把页岩气勘探作为国内天然气业务的主攻方向，并加大勘探投入和调整勘探部署，明确提出中国石化要成为中国页岩气勘探的第一个突破者、第一个实现规模开发的实践者。战略重心的转移，勘探布局的调整，投入力度的加大和实践经验的积累使中国石化在页岩气勘探上的突破成为可能，成为必然。2012年11月28日，在川东南焦石坝地区的焦页1HF井（垂深2450m、水平段长1008m）在上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩层段经压裂试气获日产气20.3万 m^3 ，这是近年打出的第一口高产页岩气井，意味着中国石化在页岩气勘探上实现了重大突破。勘探的突破并不意味着开发的成功。首先由于地质条件的不同，气层埋深不同，国外现有开发技术存在“水土不服”问题，必须进行再创新再改造，有的领域还需完全自主创新等，这是成功开发中国页岩气必须完成的作业。另外，既然是非常规天然气开发，就不能用我们熟悉的常规油气田开发的思路和程序，这才能使我们在没有道路，没有基础设施，缺少基本施工条件的偏远山区用了短短3年时间，于2015年年底建成了50亿 m^3/a 产能的我国第一个商业性页岩气田——涪陵页岩气田。预计2017年年底，将建成年产100亿 m^3 天然气的生产能力。根据中国石化近年来的勘探成果，仅在四川、重庆两地发现的天然气资源量就

达10 万亿 m^3 。涪陵页岩气田的成功开发将催生中国页岩气开发高潮的到来，预示着中国天然气大发展时代即将来临。

中国非常规油田勘探开发特别是页岩油气勘探开发仍处在发展初期，对资源的评估和认识，对地质规律的认识，对勘探开发技术研发和设施装备的制造都不能满足需求，还有很长的路要走，我们必须坚定不移，下大功夫，花大力气，缩短差距，迎头赶上。

相对美国而言，中国页岩气的开发具有天然劣势。一是中国页岩气层埋藏深(一般比美国深 60% ~ 100%)，地质条件复杂；二是地处偏远山区，没有道路，大型压裂设备进出不便，也没有平整、连片的压裂场地；三是缺乏近便的天然气管网等基础设施，暂时还无法对一般 - 中等规模的勘探发现进行商业开发；四是虽然是偏远山区但仍是人口密集区，对环保要求更高。所有这些都导致勘探开发成本远远高于美国，同时对各种技术有更高的要求。中国页岩气在地质上纵向层数多，累计厚度大，横向分布广，总体气资源非常丰富。但由于成本高，眼下大规模开发受到制约。留得青山在，不怕没柴烧。中国页岩气大规模开发要从两个领域突破，即创新降低勘探开发成本的技术系列及配套装备和创新提高产量的技术系列及配套装备。

(三)

总体而言，中国非常规油气勘探开发仍处在发展初期。但中国在非常规油气的各个领域都有大量的实践，并且有很成功的经验。归纳总结我国的实践和经验，通过与国内外实践成果对比，把个体的感性认识上升为共性的理性认识，介绍不同的实践操作程序与方法，供各类石油地质师、油藏工程师、石油工程师在实践中借鉴参考，是编写这本书的初衷。

本书一共9章，第一章介绍了非常规油气资源的分类及特征、主要资源评价和储量计算方法，描述了各类非常规油气资源量及分布情况，主要由周庆凡、杨国丰、谷宁、包书景、白振瑞等编写完成，周庆凡统稿；第二章介绍了国内外页岩油气资源勘探开发历程及发展，页岩油气资源相关地质理论、勘探和开发技术等，并选取美国沃斯堡盆地巴奈特页岩气、威利斯顿盆地巴肯组页岩油和我国渤海湾盆地济阳拗陷罗家地区沙河街组页岩油等做案例分析，主要由高波、黎茂稳、胡小虎、尚根华、张金川等编写完成，高波统稿；第三章介绍了致密砂岩油气的勘探开发历程及现状，致密砂岩气和致密砂岩油的地质特征、成藏规律、开发方法及方案编制，并通过北美艾伯塔盆地致密砂岩油气藏和我国大牛地气田等做案例分析，主要由刘红、尹伟、严谨、史云清、陈舒薇、宋传真等编写完成，刘红、尹伟统稿；第四章介绍了煤层气的勘探开发历程和现

状,煤层气的基本地质特征、形成因素、主控条件和有关开发理论和方法等,通过美国圣胡安盆地、粉河盆地和我国鄂尔多斯盆地延川南地区煤层气等做案例分析,主要由龙胜祥、王立志、李辛子、张奉东、王传刚等编写完成,龙胜祥、王立志统稿;第五章介绍了油砂、油页岩、水溶气和天然气水合物等其他非常规油气资源的分布、成藏条件和开发现状等,并分别选取典型案例注释说明,主要由白振瑞、卢雪梅、孙鹏、吴传芝、赵克斌等编写完成,白振瑞统稿;第六章介绍了各类非常规油气资源的储层特点及其地球物理技术需求,总结了致密砂岩油气、页岩油气和煤层气的地球物理技术,特别介绍了微地震压裂检测技术等,主要由董宁、刘喜武、李军、霍志周、刘宇巍等编写完成,董宁、刘喜武统稿;第七章介绍了非常规油气资源的钻完井技术,包括岩石力学特性分析技术、“井工厂”钻井技术、钻井液技术和水平井固井完井技术等,并选取具有代表性的页岩气、致密油气和煤层气井做案例分析,主要由曾义金、丁士东、张保平、陈军海、牛新明等编写完成,曾义金统稿;第八章介绍了非常规油气资源储层岩石力学性质与可压性,重点描述了其储层改造和储层保护技术,并以涪陵页岩气藏、大牛地致密砂岩气藏和延川南区块煤层气藏的相关钻井做案例分析,主要由孙志宇、李凤霞、刘长印、李宗田等编写完成,李宗田统稿;第九章介绍了发展非常规油气资源的重要性与迫切性,以及当前非常规油气资源发展的机遇与挑战,并对全球和我国非常规油气资源发展的前景进行了展望,主要由侯明扬、周庆凡、包书景、高波编写完成,周庆凡统稿。全书最后由傅成玉、周庆凡等进行内容安排和统一审校、定稿。

本书涵盖的内容多而繁杂,参加编写人员较多,对没有提及的参编人员表示诚挚的谢意!

在本书的编写过程中,中国石油化工集团公司和股份公司有关下属单位(油田勘探开发事业部、石油工程管理部、石油勘探开发研究院、工程技术研究院、中国石化出版社等)以及中国地质大学能源学院给予了大力支持和通力协作,在此深表感谢。

本书涉及非常规勘探开发的方方面面,编写难度较大,难免挂一漏万,加之编写人员水平有限、编写时间紧迫,不足之处敬请读者提出宝贵批评意见和建议,以便修订时补充完善。



目 录

第一章 非常规油气类型与资源评价	(1)
第一节 非常规油气类型及主要特征	(1)
一、非常规油气资源概念	(1)
二、非常规油气的主要类型	(2)
三、非常规油气资源特征	(5)
第二节 非常规油气资源评价方法	(7)
一、非常规油气资源评价的思路	(7)
二、地质因素分析法	(8)
三、FORSPAN 模型法	(14)
四、其他非常规油气资源评价方法	(19)
第三节 非常规油气储量计算方法	(21)
一、致密砂岩油气储量计算方法	(22)
二、煤层气储量计算方法	(25)
三、页岩油气储量计算方法	(27)
四、油砂储量计算方法	(29)
五、储量计算实例	(30)
第四节 非常规油气资源量及其分布	(32)
一、页岩气	(32)
二、页岩油(致密油)	(33)
三、致密砂岩气	(34)
四、煤层气	(34)
五、油砂	(35)
六、油页岩	(35)
七、水溶气	(35)
八、天然气水合物	(35)
参考文献	(36)
第二章 页岩油气勘探开发	(38)
第一节 页岩油气勘探开发历程及现状	(38)

一、国外页岩油气勘探开发历史及现状	(38)
二、国内页岩油气勘探开发历史及现状	(39)
第二节 页岩油气地质与勘探	(42)
一、富有机质页岩形成与分布	(42)
二、页岩储层特征	(46)
三、页岩油气的形成与分布	(54)
四、页岩油气选区与目标评价	(61)
第三节 页岩油气开发	(66)
一、页岩气开发方案编制、井网优化及产能评价	(66)
二、页岩油开发方案编制、井网优化及产能评价	(85)
第四节 页岩油气勘探开发实例	(101)
一、沃斯堡盆地巴奈特页岩气	(101)
二、阿巴拉契亚盆地马塞勒斯页岩气	(108)
三、威利斯顿盆地巴肯组页岩油	(116)
四、渤海湾盆地济阳坳陷罗家地区沙河街组页岩油	(123)
五、南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油	(131)
参考文献	(140)
第三章 致密砂岩油气勘探开发	(146)
第一节 致密砂岩油气勘探开发历程及现状	(146)
一、国外致密砂岩油气勘探开发历程及现状	(146)
二、国内致密砂岩油气勘探开发历程及现状	(147)
第二节 致密砂岩气地质特征与成藏规律	(151)
一、致密砂岩气地质特征	(151)
二、致密砂岩气的成藏主控因素与机制	(162)
第三节 致密砂岩油地质特征、形成与分布	(173)
一、致密砂岩油地质特征	(173)
二、致密砂岩油分布规律与富集主控因素	(178)
第四节 致密砂岩气藏开发研究与方案编制	(184)
一、气藏描述	(184)
二、气藏工程	(188)
三、开采工艺	(200)
四、致密砂岩气藏开发方案编制技术要求	(203)
第五节 致密砂岩油藏开发研究与方案编制	(204)
一、开发实验技术及渗流机理	(204)

二、油井生产动态特征及产能评价	(209)
三、致密砂岩油藏数值模拟技术	(214)
四、致密砂岩油田开发技术政策	(216)
五、开采工艺	(221)
六、开发方案编制技术要求	(223)
第六节 致密砂岩油气藏勘探开发实例	(226)
一、艾伯塔盆地致密砂岩油气藏	(226)
二、鄂尔多斯盆地致密砂岩气田——大牛地气田	(234)
三、鄂南三叠系致密砂岩油田——红河油田	(238)
参考文献	(242)
第四章 煤层气勘探开发	(247)
第一节 煤层气的勘探开发历程及现状	(247)
一、国外煤层气勘探开发历程及现状	(247)
二、中国煤层气勘探开发现状	(248)
第二节 煤层气基本地质特征	(249)
一、煤层沉积环境	(249)
二、煤储层岩石学特征	(250)
三、煤储层物性特征	(250)
四、煤储层吸附与解吸特征	(252)
第三节 煤层气形成条件及主控因素	(254)
一、煤层气成因类型	(254)
二、煤层气富集条件	(255)
三、煤层气富集的主控因素	(262)
第四节 煤层气开发	(264)
一、煤层气流动机理	(264)
二、煤层气产能评价	(267)
三、煤层气数值模拟	(269)
四、开发方案编制	(270)
五、开发井网优化	(275)
六、排采工艺技术	(276)
第五节 煤层气勘探开发实例	(277)
一、鄂尔多斯盆地延川南地区煤层气	(277)
二、圣胡安盆地	(285)
三、粉河盆地	(295)
参考文献	(304)

第五章 其他非常规油气勘探开发	(306)
第一节 油砂	(306)
一、油砂勘探开发现状	(306)
二、油砂的性质	(310)
三、油砂成矿条件与模式	(312)
四、我国油砂资源状况	(316)
五、加拿大阿萨巴斯卡油砂矿简介	(318)
第二节 油页岩	(321)
一、油页岩勘探开发现状	(321)
二、油页岩地质特征	(328)
三、油页岩成矿条件	(328)
四、中国油页岩资源状况	(329)
第三节 水溶气	(330)
一、水溶气研究开发现状	(330)
二、水溶气地质特征	(330)
三、水溶气成藏条件及分布规律	(331)
四、中国水溶气资源状况	(332)
第四节 天然气水合物	(333)
一、天然气水合物研究现状	(333)
二、天然气水合物形成条件与赋存规律	(338)
三、中国天然气水合物资源状况	(339)
参考文献	(344)
第六章 非常规油气地球物理技术	(350)
第一节 概述	(350)
一、非常规油气储层特点与地球物理技术需求	(350)
二、非常规油气地球物理技术进展与发展趋势	(351)
第二节 致密砂岩油气地球物理技术	(352)
一、岩石物理技术	(352)
二、致密砂岩油气储层测井评价	(356)
三、致密砂岩油气地震识别与综合预测技术	(364)
第三节 页岩油气地球物理技术	(376)
一、岩石物理技术	(376)
二、页岩气测井评价技术	(384)
三、页岩油气地震识别与综合预测技术	(394)

第四节 煤层气地球物理技术	(410)
一、岩石物理技术	(410)
二、煤层气测井评价	(411)
三、煤层气地震识别与综合解释技术	(412)
第五节 微地震压裂监测技术	(417)
一、微地震技术概述	(417)
二、微地震采集技术	(418)
三、微地震处理技术	(419)
四、微地震解释技术	(421)
参考文献	(423)
第七章 非常规油气钻完井技术	(426)
第一节 岩石力学特性分析技术	(426)
一、岩石力学实验分析方法	(426)
二、岩石力学参数的测井解释方法	(431)
第二节 “井工厂”钻井技术	(434)
一、“井工厂”的概念及特点	(434)
二、水平井井眼方位和轨道选择	(435)
三、“井工厂”井眼轨道设计技术	(437)
四、水平井钻井工艺	(445)
五、“井工厂”作业流程	(449)
第三节 钻井液技术	(456)
一、页岩地层井眼稳定技术	(456)
二、油基钻井液技术	(461)
三、水基钻井液技术	(463)
四、油基钻井液重复利用及环保处理技术	(465)
第四节 水平井固井完井技术	(465)
一、压裂对固井水泥环力学需求	(466)
二、固井水泥浆体系设计	(470)
三、油基钻井液清洗技术	(472)
四、固井工艺措施	(475)
第五节 完井方式及完井工具	(478)
一、完井方式	(478)
二、完井工具及工艺	(479)

第六节 钻完井作业实例	(486)
一、页岩气井作业实例	(486)
二、致密油气井作业实例	(490)
三、煤层气井作业实例	(493)
参考文献	(494)
第八章 非常规油气储层改造与保护技术	(496)
第一节 岩石力学性质与可压性分析	(497)
一、岩石力学性质	(497)
二、岩石可压性分析	(499)
第二节 储层改造技术	(505)
一、非常规油气藏压裂优化设计	(505)
二、分段压裂施工管柱及工艺要求	(518)
三、压裂材料	(526)
第三节 储层保护技术	(538)
一、储层伤害机理	(538)
二、钻完井过程中的储层保护技术	(541)
三、压裂改造过程中的储层保护技术	(543)
第四节 实例分析	(546)
一、涪陵区块 A 井实例分析	(546)
二、致密气藏 B 井分段压裂实例分析	(550)
三、煤层气 C 井实例分析	(554)
四、美国巴奈特页岩气井“同步压裂”实例分析	(557)
参考文献	(560)
第九章 非常规油气资源发展展望	(563)
第一节 发展非常规油气资源的重要性与迫切性	(563)
一、发展非常规油气资源的重要性	(563)
二、我国发展非常规油气资源的迫切性	(564)
第二节 非常规油气资源发展的机遇与挑战	(565)
一、非常规油气资源发展的机遇	(565)
二、非常规油气资源开发面临的挑战	(566)
第三节 非常规油气资源发展前景展望	(569)
一、全球非常规油气资源发展前景	(569)
二、我国非常规油气资源发展前景	(572)
参考文献	(573)

第一章 非常规油气类型与资源评价

由于常规油气勘探开发高峰期已过，常规油气产量呈不断下降趋势，加之对能源需求的不断增长，加强非常规油气资源勘探开发、增加油气资源供给日益重要。特别是近十几年来，美国在页岩气及页岩油勘探开发方面取得了举世瞩目的成就，相继实现了页岩气、页岩油大规模商业性开发，引发了一场全球性的页岩革命，这不但改变了北美的油气供需结构，而且对全球能源格局和地缘政治产生了巨大影响，引起了世界各国和油气公司的高度重视，大大增强了人们开发非常规油气资源的信心和决心。受美国非常规油气开发的影响，近年来，许多国家和地区加大了非常规油气的勘探开发力度，非常规油气资源发展步伐不断加快。我国广泛分布的沉积盆地中蕴藏着多种类型的非常规油气资源，随着经济社会的快速发展和人民物质文化生活水平的不断提高，油气资源的供需矛盾日益突出，常规油气资源增储上产难度越来越大，因此，加快我国非常规油气资源的开发，对于保障国家能源安全、实现经济可持续发展具有重要意义。

第一节 非常规油气类型及主要特征

一、非常规油气资源概念

非常规油气是相对以往勘探开发的常规油气而言的，在常规油气勘探开发实践中，陆续发现一些难以用传统的油气生成和聚集理论解释的、不能用常规油气勘探开发技术进行商业开采的油气资源，人们便将这些油气资源统称为非常规油气资源。截至目前，仍未形成一个公认的非常规油气资源的概念和分类体系。由于界定的角度不同，关于非常规油气资源的定义也就不一样。

工程技术角度的定义：目前大多数人是从工程技术角度来定义非常规油气资源的。所谓非常规油气资源是指采用现有常规技术难以实现经济开发的油气资源。如美国全国天然气委员会(NPC)将非常规天然气定义为只有采用先进的开采技术组合才能采出的天然气；美国能源安全联合研究协会(RPSEA)认为非常规油气资源是采用普通勘探开发技术难以表征和进行商业性生产的油气聚集。国内文献中也常将非常规油气资源定义为不能用常规的方法和技术手段进行勘探开发的油气资源。在这种定义下，非常规油气资源的内涵会随时间而发生变化；勘探开发技术的进步，可使原本不具经济性的油气资源变为可商业化开发的油气资源。

地质角度的定义：从地质角度定义非常规油气资源更具客观性，因为油气藏的地质特征不会受到油气产业发展的影响。Law 和 Curtis(2002)认为，常规与非常规油气藏在地质上存在着根本性差异。常规油气藏是受浮力驱动形成的，其分布表现为受构造圈闭或岩性圈闭控制的不连续分布形式；而非非常规油气藏则是由非浮力驱动形成的，分布表现为不受构造或岩性圈闭控制的区域性连续分布形式。美国地质调查局(USGS)从油气藏的地质特征出发，提出“连续型油气藏”的概念(J. W. Schmoker, 2005)，指空间分布范围大、无清晰边界且不依赖于水柱而存在的油气藏。为了统一概念，美国石油工程师学会(SPE)、世界石油大会

(WPC)、美国石油地质师协会(AAPG)和石油评估工程师学会(SPEE)2007年共同发布了《石油资源管理系统》(简称PRMS)取代了2000年发布的《石油资源分类和定义》,为油气资源分类提供了一个国际标准,认为非常规油气资源是指在某一范围内连续分布且不受水动力显著影响的油气聚集。这与USGS提出的连续型油气藏的概念有异曲同工之妙,也可以认为连续型油气藏实际上就是地质意义上的非常规油气藏。

经济角度的定义:非常规油气资源是指次经济和处在盈亏平衡点附近的油气资源。美国早期就是把经济性作为划分常规油气和非常规油气的主要依据。例如20世纪70年代早期和中期,美国大多数勘探家将次经济和在经济评价中处于盈亏平衡点上的煤层气、页岩气、致密(低渗透)气、致密油等油气资源称为非常规油气资源。但在这种定义下,非常规油气的内涵会随着油气价格及其他政治经济条件的改变而变化。从经济角度定义难以客观地反映常规和非常规油气资源的区别,因为受油气及相关产业发展的影响,油气资源的经济性在不断地发生变化。

以上3种非常规油气资源的定义都只是考虑了这类油气资源某一方面的特征,而没有综合考虑其各种特征。Singh等(2008)、Old等(2008)、Martin等(2010)以及Cheng等(2010)都认为,非常规油气资源是指因特殊的储层岩石性质(基质渗透率低和存在天然裂缝)、特殊的充注(自生自储岩石中的吸附气、天然气水合物)和/或特殊的流体性质(高黏度),只有采用先进或特殊技术以及大型增产处理措施和/或特殊的回收加工工艺才能获得经济开发的油气聚集(赵靖舟,2012)。邹才能等(2013)提出,非常规油气是现今无法用常规方法和技术手段进行经济性勘探开发的资源,其特点是资源规模大、储层物性差,一般孔隙度小于10%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。综上所述,本书认为非常规油气资源就是在成藏机理、赋存方式、分布规律和勘探开发技术等方面有别于常规油气资源的烃类资源。

二、非常规油气的主要类型

非常规油气资源丰富、种类多样,目前还没有统一的非常规油气资源划分方案,但是资源类型通常可以归纳为两大类:非常规天然气资源和非常规石油资源。非常规天然气资源包括页岩气、煤层气、致密砂岩气(深盆气)、水溶气、天然气水合物等;非常规石油资源包括页岩油、致密油、油页岩、油(沥青)砂、重(稠)油等。各种类型的非常规油气资源与常规油气资源在成因上密切联系、空间分布上相互伴生,在沉积盆地(凹陷)中的空间分布见图1-1。下面对主要非常规油气类型作简单介绍。

(一)页岩气

页岩气(Shale Gas)是指主要以游离和吸附方式赋存于富有机质和极低孔渗泥页岩地层系统中的天然气。主要特征有:①页岩气成因类型及储集岩性多样,页岩气可以是生物化学成因气、热成因气或二者的混合,储集岩性主要是富含有机质泥页岩,可以有砂岩和碳酸盐岩夹层,组成含气泥页岩层段;②页岩气赋存状态多样,主体以游离态和吸附态赋存于泥页岩层段中,前者赋存于基质孔隙和裂缝中,后者主要赋存于有机质、黏土矿物表面上,此外还有少量页岩气以溶解态存在于有机质、液态烃以及残留水中;③页岩气藏为典型的“自生自储”成藏模式,富含有机质泥页岩既是烃源岩又是储集岩,页岩气就是残留在富含有机质泥页岩层段中的天然气;④与致密砂岩相比,泥页岩孔隙度更小、渗透率更低,纳米孔隙、有机质孔隙、微裂缝是其主要储集空间;⑤含气泥页岩层段主要位于盆地或凹陷中心及邻近斜坡带,属于源内聚集,构造上往往处于构造低部位;⑥页岩气开发需要特