

国外油气勘探开发新技术译丛

SHALE GAS PRODUCTION PROCESSES

北美页岩气资源及开采

■ [美] James G. Speight 著

■ 胡风涛 白振瑞 等译

中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

北美页岩气资源及开采

Shale Gas Production Processes

[美]James G. Speight 著

胡风涛 白振瑞 等译

中国石化出版社

著作权合同登记 图字: 01-2014-8336号

This edition of *Shale Gas Production Processes* by James Speight is published by arrangement with ELSEVIER INC., a Delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA

中文版权为中国石化出版社所有。版权所有, 不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

北美页岩气资源及开采 / (美) 斯贝特(Speight, J.G.) 著;
胡风涛, 白振瑞译. —北京: 中国石化出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5114-3482-1

I. ①北… II. ①斯… ②胡… ③白… III. ①油页岩
—气田开发—研究—北美洲 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第183148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

北京科信有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092毫米 16开本 10印张 129千字

2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

定价: 48.00元

译者序

据EIA预测(IEO 2003), 2010~2040年间, 在经济发展的带动下, 全球能源消费将增长56%。虽然可再生能源和核能都将以每年2.5%的速度增长, 但化石燃料在世界能源使用总量中所占比重仍将保持在80%左右。油气在化石能源供应中的主体地位仍将保持不变, 全球石油及其他液态燃料的年消费量将从2010年的4.45Gt增长到2040年的5.88Gt; 而全球天然气消费量将从2010年的 $3.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 大幅增加到2040年的 $5.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

与此同时, 油气供应面临的挑战却在不断加大。随着世界油气勘探程度的不断提高, 条件比较好的常规油气发现的数量在减少, 而且规模也在变小。油气勘探的重点领域逐渐转向条件恶劣的深水、沙漠、极地及偏远地区。在油气开发方面, 成熟油气区常规油气资源的开采难度在逐渐加大, 对油气藏管理的要求越来越高, 提高采收率已成为增储上产的重要途径。新的大型油气发现大都集中在深海, 例如墨西哥湾和巴西海域盐下层以及西非和东非深海的大型油气发现, 这些油气田的开发面临极大的技术挑战。非常规油气资源潜力巨大, 近年来, 随着技术的进步, 越来越多的非常规油气资源得以开发。北美(尤其是美国)的页岩气和致密油开发快速发展, 已经成为当前油气工业的热点和亮点。据BP公司预测, 到2030年全球页岩气产量将达到 $7540 \times 10^8 \text{m}^3$, 占当年天然气总产量的16.5%; 致密油产量将达到450Mt, 占原油总产量的9%。

在油气勘探开发难度增加的同时, 环境保护的要求也在不断提高。油气的勘探和开采都会产生大量的污染源, 如果处理措施不当, 都会造成极

其严重的环境破坏。在当今大力倡导绿色发展的形势下，油气行业需要增强环保意识，并努力做好环境保护工作。

不论是复杂地区的油气勘探、老油区的增储上产，还是勘探开发过程中的环境保护，都需要有先进的新技术。国外(尤其是美国)等油气技术强国在油气上游的各个领域都在不断进行技术创新，而且也积累了丰富的经验，相关的技术文献很多。

为了引介国外先进的油气勘探开发理论和技术，进一步促进我国相关领域的理论研究和技术研发，由中国石化集团公司科技部组织，中国石化石油勘探开发研究院牵头，联合中石化石油工程设计有限公司、中国石化河南油田分公司、中国石化江汉油田分公司、中国石化出版社等单位，召集有关专家学者，根据国内油气勘探开发的技术需求，在广泛征求业内专家意见的基础上，优选了一批代表国外油气勘探开发技术最新成果的科技专著，以丛书的形式翻译出版，供国内读者阅读、参考。

本套丛书的顺利出版，是团队合作的结果，是集体智慧的结晶。向给予大力支持的以上单位和参与翻译出版工作的专家们致以诚挚谢意！

由于本套丛书涉及的专业面较广，而参与翻译和审校人员的专业背景不同，难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

译丛编译工作组

2015年5月

前言

页岩地层中天然气(页岩气)的开采是当前天然气勘探和开发中增长最快的领域之一。随着页岩气开发的快速发展,天然气钻探和生产活动已经拓展到了美国以往很少有或者根本没有此类活动的地区。因此,页岩气的开发不仅改变了美国的能源分布格局,而且还带来了环境和社会经济面貌的改变,尤其是在那些天然气开发还是新生事物的地区。然而,随之也出现了诸多的问题,包括对页岩气开发性质的认识、潜在的环境影响以及现有监管框架应对这些问题的能力等。

页岩气可以吸附在有机质表面上,因而被视为非常规天然气资源。页岩气赋存在难于开采的页岩储层中,而页岩能够储存大量的天然气,不仅其粒间孔隙可以储存天然气,而且页岩中的有机质颗粒也能够像海绵一样储存天然气。对于其沉积盆地中拥有相当大规模页岩气资源的国家而言,页岩气资源评价会对其能源安全产生直接而积极的影响,因此,沉积盆地页岩气潜力评价目前已经成为全球油气开发的一个重要研究课题,也是很多国家政府非常感兴趣的方面。然而,人们已意识到页岩气储量估算结果并不是静态的,而是会随着新的发现以及钻井和开采技术的进步而逐年变化。

页岩气在全球的重要性在逐渐增强,更加深入地研究页岩的特性已成为一项必须开展的工作。有了对含气页岩储层更深入和全面的认识,人们就可以更好地就这些资源的开发作出决策。要发现页岩气资源可能并不难,但要开采页岩气则需要有成本高昂的先进技术。如果采用直接钻穿

含气页岩地层的方式钻直井，那么井筒与页岩的接触面积就非常小，无法满足天然气从地层中流出的需要。水力压裂是增大这种接触面积从而确保获得足够高页岩气产量的唯一途径。20年前，页岩气的重要性还非常有限，但由于发生自然灾害时经常会出现天然气供应短缺且价格上涨等问题，人们担心天然气的价格会持续走高。因此，本书的目的是介绍页岩气资源、有关页岩地质力学性质的认识、水力压裂的需求以及页岩气处理。本书还向读者介绍了页岩气开发的性质、潜在的环境影响以及当前监管框架应对这些问题的能力。本书还可以为科学家、工程师、管理人员、监管人员和政策制定者提供客观的信息来源，以便他们根据这些信息就如何应对可能出现的挑战而作出决策。

James G. Speight博士

怀俄明州拉勒米市

2013年5月15日



目 录

第1章 页岩气的起源	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 页岩	(2)
1.3 储层	(7)
1.4 页岩气	(9)
1.4.1 起源	(12)
1.4.2 页岩储层	(13)
1.5 页岩气与能源安全	(17)
参考文献	(19)
第2章 页岩气资源	(23)
2.1 引言	(23)
2.2 美国的页岩气资源	(27)
2.2.1 安特里姆页岩	(30)
2.2.2 巴肯页岩	(32)
2.2.3 巴奈特页岩	(33)
2.2.4 巴克斯特页岩	(35)
2.2.5 凯尼页岩	(35)
2.2.6 查塔努加页岩	(36)



2.2.7 科纳索加页岩·····	(37)
2.2.8 伊格尔福特页岩·····	(38)
2.2.9 费耶特韦尔页岩·····	(39)
2.2.10 弗洛伊德页岩·····	(39)
2.2.11 海因斯韦尔页岩·····	(40)
2.2.12 赫莫萨页岩·····	(43)
2.2.13 刘易斯页岩·····	(44)
2.2.14 曼科斯页岩·····	(44)
2.2.15 马塞勒斯页岩·····	(46)
2.2.16 尼尔页岩·····	(47)
2.2.17 新奥尔巴尼页岩·····	(49)
2.2.18 奈厄布拉勒页岩·····	(49)
2.2.19 俄亥俄页岩·····	(50)
2.2.20 皮尔索尔页岩·····	(51)
2.2.21 皮尔页岩·····	(51)
2.2.22 犹他页岩·····	(52)
2.2.23 尤蒂卡页岩·····	(53)
2.2.24 伍德福德页岩·····	(54)
2.3 世界其他地区的页岩气资源·····	(55)
2.3.1 阿根廷(内乌肯盆地)·····	(56)
2.3.2 加拿大·····	(56)
2.3.3 中国(四川和塔里木盆地)·····	(61)
2.3.4 波兰·····	(61)
2.3.5 南非·····	(61)
参考文献·····	(62)



目 录

第3章 开采技术	(71)
3.1 引言.....	(71)
3.2 钻井和完井.....	(74)
3.2.1 水平钻井.....	(77)
3.2.2 井工厂钻井技术.....	(78)
3.2.3 纵向多分支钻井技术.....	(79)
3.2.4 平面多分支钻井技术.....	(79)
3.2.5 完井技术.....	(80)
3.2.6 生产、废弃和复原.....	(81)
3.3 水力压裂.....	(83)
3.3.1 一般特征.....	(85)
3.3.2 压裂液.....	(88)
3.3.3 压裂液添加剂.....	(90)
3.3.4 裂缝诊断.....	(91)
3.4 生产趋势.....	(93)
3.4.1 技术.....	(93)
3.4.2 前景.....	(95)
参考文献.....	(96)
 第4章 页岩气的性质及处理	(101)
4.1 引言.....	(101)
4.2 天然气加工.....	(104)
4.3 页岩气.....	(109)
4.4 页岩气的性质与处理.....	(110)
4.4.1 安特里姆页岩.....	(114)



4.4.2 巴奈特页岩·····	(115)
4.4.3 费耶特韦尔页岩·····	(116)
4.4.4 海因斯韦尔页岩·····	(116)
4.4.5 马塞勒斯页岩·····	(117)
4.4.6 新奥尔巴尼页岩·····	(117)
参考文献·····	(117)
 第5章 环境问题 ·····	 (121)
5.1 引言·····	(121)
5.2 环境监管·····	(123)
5.2.1 概况·····	(125)
5.2.2 新法规·····	(126)
5.3 环境影响·····	(128)
5.3.1 空气污染·····	(129)
5.3.2 水污染·····	(132)
5.3.3 流体管理·····	(140)
5.3.4 诱发地震活动·····	(141)
5.4 恢复要求和展望·····	(142)
参考文献·····	(145)
 附录 本书涉及的单位换算 ·····	 (149)



第1章 页岩气的起源

1.1 引言

通用术语“天然气(natural gas)”通常是指与含油气层系(产油气或含油气)有关的气体。天然气一般含有大量的甲烷(一种单碳的烃类化合物, CH_4)和少量的碳原子数可多达6个的具有较高相对分子质量的烷烃($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)(见表1.1)。天然气中的烃类组分是可燃的,但天然气还含有少量不可燃的非烃组分(比如二氧化碳、氮气和氦气),它们被称为杂质。

表1.1 天然气的典型组成

名称	分子式	含量, % (体)
甲烷	CH_4	>85
乙烷	C_2H_6	3~8
丙烷	C_3H_8	1~5
丁烷	C_4H_{10}	1~2
戊烷 ^①	C_5H_{12}	1~5
二氧化碳	CO_2	1~2
硫化氢	H_2S	1~2
氮气	N_2	1~5
氦气	He	<0.5

① 戊烷和更高相对分子质量的烃类,包括苯和甲苯(Speight 2007)。

除了在油藏中存在天然气之外,还有只赋存天然气的纯气藏。天然气的主要组分是甲烷,但是也存在其他一些烃类,比如乙烷、丙烷和丁烷。二氧化碳也是一种常见的组分。稀有气体(比如氦气)也会少量存在。某些天然气藏是这些稀有气体的来源。就像石油一样,天然气组分的变化也很大。



北美页岩气资源及开采

不同气藏的天然气成分存在差异,同一油气田内的两口井也会生产出成分不同的天然气(Mokhatab et al 2006; Speight 2007, 2014)。

天然气资源通常分为两大类:常规天然气和非常规天然气(Mokhatab et al 2006; Speight 2007, 2014)。常规天然气通常分布在渗透率大于 1mD ($1\text{mD}=1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,下同)的储层中,可以采用传统技术进行开采。目前全球生产的大部分天然气都是常规天然气。常规天然气的开采相对容易,而且成本较低。相反,非常规天然气赋存在渗透率较低($<1\text{mD}$)的储层中,所以采用常规技术无法将其开采出来。

有多个关于天然气的常用术语。“干气(lean gas)”是指以甲烷为主要组分的天然气;“湿气(wet gas)”是指含有较多相对分子质量较高的烃类的天然气;“含硫气(sour gas)”是指含有硫化氢的天然气;“低硫气”是指含极少量硫化氢的天然气(sweet gas);“残余气(residue gas)”是指高相对分子质量的烃类被抽提出来以后的天然气;“井口气(gasing head gas)”是指通过井口分离器从石油中分离出的天然气。

如果要进一步给出干气和湿气定量化的定义,那么“干气”是指每 1000ft^3 ($1\text{ft}^3\approx 0.028\text{m}^3$,下同)中汽油蒸汽(相对分子质量较高的烷烃)含量低于 0.1gal (在美国 $1\text{gal}\approx 3.785\text{L}$,下同)的天然气,而“湿气”则是指每 1000ft^3 中汽油蒸汽含量高于 0.1gal 的天然气。

1.2 页岩

页岩和粉砂岩地层是地壳上分布最广的沉积岩。在石油地质中,富有机质页岩地层既是烃源岩,也是圈闭石油和天然气的盖层(Speight 2007)。在油藏工程中,页岩地层被视为流动遮挡层。在钻井中,所钻遇页岩的总厚度往往要大于储集砂岩。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。所以,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。页岩地层在全球各地都有分布(参见第2章)。



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安静的水体环境中,并且埋藏了数百万年。页岩地层可以充当盆地中的压力阻挡层、顶部封盖层或者页岩气区带的储层。

更专业地讲,页岩是以粉砂级和黏土级颗粒为主、易剥裂的陆源沉积岩(Blatt, Tracy 2000)。在这个定义中,“易剥裂”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,含水体系的流体压力会明显增大,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。

在随着沉积物沉积了大量有机质的情况下,页岩会含有固态有机物质(干酪根)。根据页岩的特征和组成,可以把它划入被称作“泥岩”的沉积岩范畴。页岩因其成层性和易剥裂性而有别于其他泥岩——页岩由大量的薄层组成,并且易于沿着层面剥裂成薄片。

页岩主要由黏土级的矿物颗粒组成,这些矿物颗粒一般是黏土矿物,例如伊利石、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,例如石英、燧石和长石。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两大类:暗色页岩和浅色页岩。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。富有机质的页岩是在少氧或无氧的水体中沉积的,这样就避免了有机质腐烂。有机质主要是随沉积物堆积的植物碎屑。

富有机质的暗色页岩是世界上许多油气藏的烃源岩。这些页岩之所以呈现暗色,是因为随泥一起沉积了细小有机质颗粒,而页岩就是由这些泥演变而来。随着泥的深埋和升温,这些有机质就转化为石油和天然气。

沉积岩中的暗色几乎总是指示有机质的存在。仅仅1%或2%的有机物质就可以使岩石表现出深灰色或黑色。另外,这种暗色通常表明页岩是由



在缺氧环境中沉积的沉积物转变而形成的。氧气一旦进入到沉积环境中，就会很快与腐化的有机质碎屑发生反应。如果存在大量的氧气，有机质碎屑就会全部腐化。贫氧的环境也为诸如黄铁矿之类的硫化矿物的形成提供了适宜的条件，黄铁矿还是大部分暗色页岩沉积物或地层中另一种重要的矿物。

暗色页岩中含有机质碎屑，因而具有生成油气的潜力。如果有机质在埋藏后得以保存，并且适当加热，就可能产生石油和天然气。巴奈特(Barnet)页岩、马塞勒斯(Marcellus)页岩、费耶特韦尔(Fayetteville)页岩及其他产气页岩都是深灰色或黑色页岩地层。

油气从页岩中排出后，在浮力的作用下穿过沉积地层向上运移，并且通常圈闭在诸如砂岩等上覆岩石的孔隙中。这些类型的油气藏就是所谓的常规油气藏，其中的流体很容易穿过孔隙流动并进入开发井中。

页岩地层在沉积盆地中普遍存在：在一口井所钻遇的地层中，页岩通常约占80%。所以，在世界上绝大部分地区，主要的富有机质页岩地层大都早已被人们发现。它们的深度从近地表到几千英尺不等，而其厚度通常在几十英尺到几百英尺之间。通常，人们对页岩的地质历史都已有比较深入的认识(见表1.2)，足以推断哪些页岩地层有可能含气(或含油，或含油气)。从这一点来看，好像没有必要去投入资金开展页岩气勘探。但是，要想搞清楚页岩中究竟含有多少天然气，尤其是技术上和经济上可采的天然气量，还需大量钻井，并进行测试。

每个页岩地层都有不同的地质特征，这些特征会影响天然气开采方式、所需技术和开采的经济性。页岩(通常较厚的页岩)的不同部位也有不同的特征：小规模甜点区(small sweet spots)或核心区(core areas)可能会比其余部分具有更高的产量，其主要原因通常是甜点区发育天然裂缝会增大渗透率(Hunter, Young 1953)。

通常，与天然气开采相伴的天然气液(NGLs——比甲烷的相对分子质



量更大的烃类,比如丙烷、丁烷、戊烷、己烷、庚烷,甚至辛烷)的产量也会有很大的变化,而其对天然气开发的经济性具有重要的意义。在目前这么低的气价下,美国大部分干气区的开发可能都不会有经济效益。而具有较高天然气液含量的页岩区带,仅开采出的天然气液就能实现盈利(天然气液的市场价格与油价关联,而与天然气的价格无关),这样就会使得开采出的天然气成为几乎是无成本的副产品。

表1.2 地质年代

代	纪	世	大概持续时间/万年	大概年代/万年
新生代	第四纪	全新世	1万年前至今	
		更新世	200	1
	第三纪	上新世	1100	200
		中新世	1200	1300
		渐新世	1100	2500
		始新世	2200	3600
		古新世	7100	5800
中生代	白垩纪		7100	6500
	侏罗纪		5400	13600
	三叠纪		3500	19000
古生代	二叠纪		5500	22500
	石炭纪		6500	28000
	泥盆纪		6000	34500
	志留纪		2000	40500
	奥陶纪		7500	42500
	寒武纪		10000	50000
前寒武			338000	60000

上世纪90年代后期,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”了世界上第一批最大的天然气资源。

得克萨斯州的巴奈特页岩气田是在页岩储层中开发的第一个大型天然气田。从巴奈特页岩中开采天然气具有很大的挑战性,因为页岩的孔隙空



间太小,天然气难以穿越页岩流到井中。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(这就是所谓的水力压裂)。

水平钻井和水力压裂技术引发了一场钻井技术革命,并且为多个巨型页岩气田的开发铺平了道路。这些气田包括阿巴拉契亚(Appalachians)盆地的马塞勒斯页岩、路易斯安那州的海因斯韦尔(Haynesville)页岩和阿肯色州的费耶特韦尔页岩。这些巨大的页岩储层中所蕴藏的天然气可以满足美国20年以上的需求。

水力特征是指能够反映岩石赋存和传输流体(比如水、石油或天然气)能力的渗透率和孔隙度等特征。从这个角度来看,页岩的颗粒粒径较小,所以粒间孔隙也很小。实际上,这些孔隙太小了,以至于石油、天然气和水难以在岩石中流动。因此,页岩可以作为石油和天然气圈闭的盖层,也可以作为阻止或限制地下水流动的隔水层。

虽然页岩地层的粒间孔隙很小,但是它们在页岩总体积中所占的比例却很大,从而使页岩有能力赋存大量的水、天然气或石油,但由于渗透率很低,这些流体不能有效流动。油气业界通过水平钻井和水力压裂在页岩内创造人工孔隙度和渗透率,从而消除了页岩的这些限制。

页岩中的黏土矿物具有吸附大量水、天然气、离子和其他物质的能力。页岩的这种特征使其可以有选择性地牢固保持或自由释放流体或离子。

页岩气资源可以视为一种技术驱动型资源,因为从这种原本不具生产能力的岩石中开采油气需要经历一个技术密集型的开发过程。要尽可能地提高页岩气产量,就需要钻数量远多于常规气田的生产井。此外,还要尽可能扩大与页岩气藏的接触面积,需要钻长度为1mile(1mile=1609.344m,下同)甚至更长的水平井段。

页岩油气开发需要通过多级水力压裂(参见第3章)产生人工流体流动