

中国页岩气革命现状与发展建议

赵全民¹, 张金成², 刘劲歌²

(1. 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 100121; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:近 10 年来, 美国页岩气革命已经改变了全球现有的能源格局, 吸引着越来越多的国家投入到页岩气的勘探开发中来。本文介绍了美国页岩气革命的发展历程及取得的成就; 简述了中国页岩气革命的发展历程和现状。结合美国页岩气革命的先进经验, 及我国页岩气资源特征及开发特点, 针对性地提出了中国页岩气勘探开发技术的发展建议, 对中国页岩气革命的大发展具有重要的指导意义。

关键词:页岩气; 革命; 发展历程; 勘探开发技术; 新能源

中图分类号: P618.13; P634; TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)08-0001-09

Status of Chinese shale gas revolution and development proposal

ZHAO Quanmin¹, ZHANG Jincheng², LIU Jingge²

(1. International Petroleum Exploration and Development Co. Ltd., Sinopec Group, Beijing 100121, China;

2. Sinopec Petroleum Engineering Technology Research Institute, Beijing 100101, China)

Abstract: In recent 10 years, the shale gas revolution in the United States has changed the energy structure, which is attracting more and more countries devoting themselves to the development of shale gas. Firstly, this paper introduces the process of the shale gas revolution in the United States and its achievement. Secondly, the paper describes the process and status of shale gas revolution in China. Finally, some development proposals are presented about the shale gas exploration of China based on the experience of the United States and the characteristic of shale gas in China. It is of great benefit to the shale gas revolution in China.

Key words: shale gas; revolution; development process; exploration technology; new energy

页岩气藏具有低孔隙度(一般为 4%~5%)、低渗透率($<10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的特点, 采收率仅为 10%~20%。美国是全球最早开发页岩气资源的国家, 拥有页岩气资源潜力盆地 50 多个, 其中 40 多个已被不同程度地进行了规模化商业开发。美国页岩气的年产量由 1998 年的 $104.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 跃升为 2018 年的 $6072 \times 10^8 \text{ m}^3$, 页岩气产量在 20 年间增长了近 60 倍^[1]。美国页岩气产量的迅速增加, 已经使全球天然气期货价格随之下降, 进而打破了俄罗斯的气价权。页岩气开发已经成为全球油气资源开发的一大热点, 深刻改变了全球的能源供应格局。所谓的美国页岩气革命(shale gas revolution), 实际上是美

国以一种经济高效的方式实现对页岩气的大规模商业开发, 从而改善美国能源供需结构, 提高能源自给水平的过程。使美国从能源进口大国华丽转身为能源生产大国, 革了全球能源输出国的命^[2-5]。

我国自 2000 年起开始关注美国页岩气勘探开发情况。2004 年启动了国内页岩气资源调查。2009 年钻成了第一口页岩气评价井——威 201 井, 井口测试获日产 $1.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流, 开启了我国页岩气勘探开发的序幕^[6-9]。2011 年底, 我国政府正式批准页岩气为新的独立矿种, 将页岩气的勘探开发列入了鼓励类投资产业。2017 年底, 中石化涪陵页岩气田率先建成产能 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为我

收稿日期: 2019-07-19 DOI: 10.12143/j.tkgc.2019.08.001

基金项目: 国家重大专项“涪陵页岩气水平井钻完井技术研究”(编号: 2016ZX05060-012)

作者简介: 赵全民, 男, 汉族, 1966 年生, 高级工程师, 从事石油钻井工程技术管理工作, 北京市朝阳区惠新东街甲 6 号, qmzhao.sipc@sinopec.com。

通信作者: 张金成, 男, 汉族, 1963 年生, 教授级高级工程师, 博士, 从事超深井钻井提速技术及页岩气水平井优快钻井技术与推广工作, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 916 室, zhangjc.sripe@sinopec.com。

引用格式: 赵全民, 张金成, 刘劲歌. 中国页岩气革命现状与发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 1-9.

ZHAO Quanmin, ZHANG Jincheng, LIU Jingge. Status of Chinese shale gas revolution and development proposal[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8): 1-9.

国首个实现商业化开发的大型页岩气田。涪陵页岩气田的开发成功,极大地提振了我国进行页岩气革命的信心,中国页岩气革命呈现出勃勃生机,但中国页岩气勘探开发还未进入快速发展阶段,主要表现为在现有工程技术能力下,页岩气开发成本仍居高不下,因此必须站高望远,埋头攻关,探寻提速提效提产的革命性或颠覆性技术,将中国页岩气革命推向高潮。

1 美国页岩气革命的发展历程及取得的成就

1.1 发展历程

美国的页岩气革命不是一夜之间爆发的,它经历了漫长的过程,其发展历程可分为以下5个阶段^[10-12]:

(1)早期勘探开发阶段(1821—1975年),也叫起步期,历经154年,以阿巴拉契亚盆地第一口页岩气井和第一个页岩气田(Big Sandy气田)为代表。北美地区是全球发现页岩气最早的地区,1821年,William A. Hart在美国纽约的弗里多尼亚钻了第一口产自页岩层的商业天然气井。1914年,在阿巴拉契亚盆地泥盆系Ohio页岩中,发现了世界上第一个页岩气田——Big Sandy。但受地质认识和技术手段的限制,1930年开始,才有个别专家提出了页岩不只是烃源岩还具有天然气储集能力的认识,但没有引起人们的重视,没有认识到页岩气可以被大规模地开发利用。

(2)地质理论与勘探开发技术攻关阶段(1976—1989年),政府开始积极推进页岩气产业,从地质、地球化学到气藏工程等方面开展了一系列理论研究与技术攻关,证实了相关地区页岩地层具有产气能力和巨大资源潜力。美国能源部(DOE)联合油公司、科研机构、高校等单位开展了非常规天然气(页岩气、致密气和煤层气)评价和开发方法研究。其中针对页岩气,1976年实施了东部页岩气工程(EGSP),主要目的有3个:开展精确的页岩气资源评价、建立勘探选区原则、开发和完善低成本的页岩气钻采技术。70多年坚持不懈的基础地质研究为页岩气革命大发展奠定了坚实的基础。

(3)大发展阶段(1990—1999年),得益于水平井钻完井技术的进步、大型水力压裂技术的突破和输气管道的规模化建设,美国页岩气产量大幅提升。Mitchell能源公司坚持在Fort Worth盆地探索试

验,综合开发了水平井钻井技术和多段水力压裂技术。这种关键技术的出现与成功应用,催生了美国这场页岩气革命,最终实现了Barnett页岩气田的规模化商业开发。经过近30年的技术沉淀和经验积累,直到2000年开始各方面条件逐步成熟并大规模商业开发页岩气。

(4)快速发展阶段(2000—2006年),水平井钻完井、大型水力压裂、重复压裂等技术的推广应用,使美国页岩气革命的发展进入了一个快速发展阶段。Barnett页岩气年产量由1999年的 $22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2006年的 $560 \times 10^8 \text{ m}^3$,Barnett页岩气田的开发成功具有里程碑意义,成为这场页岩气革命的成功标志。2000年以后,美国页岩气革命开始向世界各地蔓延。

(5)高速发展阶段(2007年至今),随着对页岩气地质认识的创新,水平井钻完井、大型水力压裂、分级压裂、多井同步压裂等技术不断突破,“井工厂”批量生产作业模式的规模化推广应用,美国页岩气革命跨入了高速发展阶段。2007年至今,页岩气产量以每年 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的速度增长,2011年页岩气产量就攀升到 $1800 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全美干气总产量的23%,2013年产量 $3090 \times 10^8 \text{ m}^3$,占到美国天然气总产量的40%,2017年页岩气产量 $5060 \times 10^8 \text{ m}^3$,2018年页岩气产量 $6072 \times 10^8 \text{ m}^3$ (参见图1)。据美国能源信息署(EIA)预测,2040年美国页岩气产量可达 $8000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.2 取得的成就

1970年,美国常规天然气产量为 $6000 \times 10^8 \text{ m}^3$,1973年达到最高峰 $6400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。到2010年近40年间,虽然美国常规天然气产量逐年降低,但随着致密气、煤层气、页岩气等非常规天然气资源的勘探开发,天然气年产量基本保持稳定状态。尤其是悄然降临的“页岩气革命”,使美国在2009年以 $6240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气产量首次超过俄罗斯成为世界第一大天然气生产国,产量地位的更替使美国天然气消费长期依赖进口的局面发生逆转^[13]。美国专家兴奋地认为,有了页岩气,美国100年无后顾之忧。2007年以后,美国页岩气进入高速发展阶段,已成为美国天然气产量构成中的主体,常规天然气与非常规天然气的占比发生了很大变化,2010年常规气占比42%,非常规天然气占比58%,其中页岩气占到23%。预计到2035年,美国天然气将以

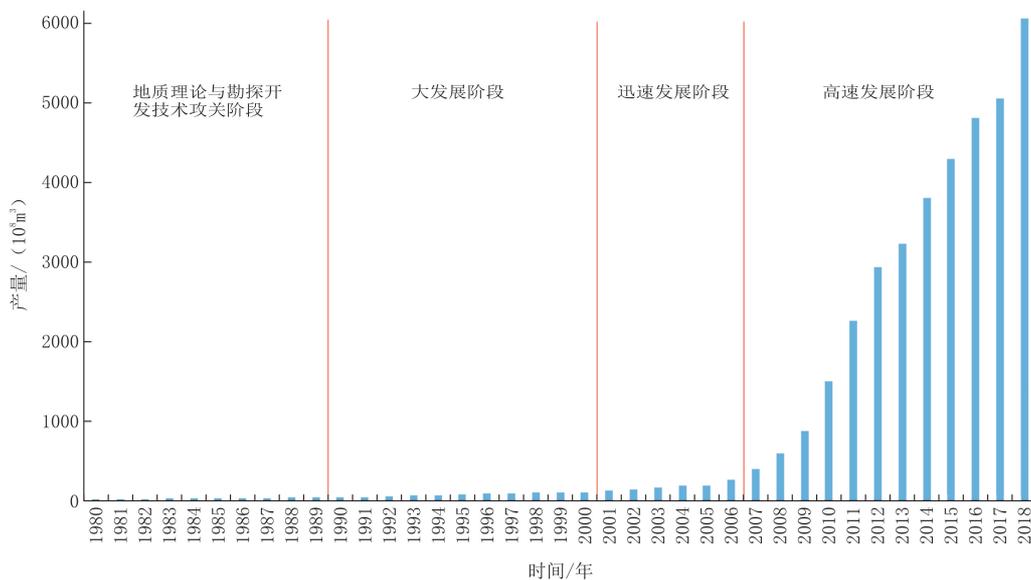


图 1 美国历年页岩气产量变化趋势图

Fig.1 Yearly shale gas production of America since 1980

非常规气为主,常规天然气的占比持续降低到 23% 左右,而那时页岩气占比将达 49%,占据美国天然气产量的半壁江山(参见图 2)。据美国能源信息署(EIA)统计,2017 年首次实现了天然气净出口,2018 年继续维持了天然气净出口态势^[1,14]。

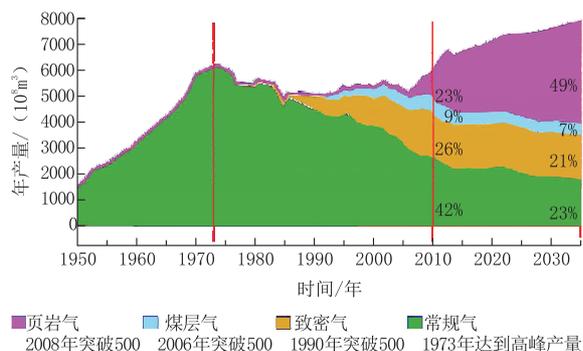


图 2 美国 1950—2035 年天然气产量变化趋势图

Fig.2 Natural gas production trend from 1950 to 2035

美国是页岩气理论技术的创新者和规模开发的引领者,美国页岩气革命对全球天然气供需关系变化和价格走势产生了重大影响,并引起了天然气生产和消费大国的广泛关注。页岩气的开发利用,成为低碳经济战略发展机遇的推动力,成为世界油气地缘政治格局发生结构性调整的催化剂,美国正在逐步掌握全球石油的定价权和主导权。

2 中国页岩气革命的发展历程及取得的成就

全球页岩气资源非常丰富,据预测,世界页岩气

资源量为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在北美、中亚和中国、中东和北非、拉丁美洲、俄罗斯等地区,页岩气的资源潜力可能大于常规天然气。我国蕴藏着丰富的页岩气资源,国土资源部油气研究中心 2012 年发布的一份报告显示,我国页岩气预估地质资源总量 $134 \times 10^{12} \text{ m}^3$,资源潜力与美国相仿,发育有海相、海陆过渡相和陆相 3 种类型(参见图 3)。美国能源信息署(EIA)数据表明,我国页岩气技术可采资源量达 $31.57 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居全球第一位(参见表 1)。

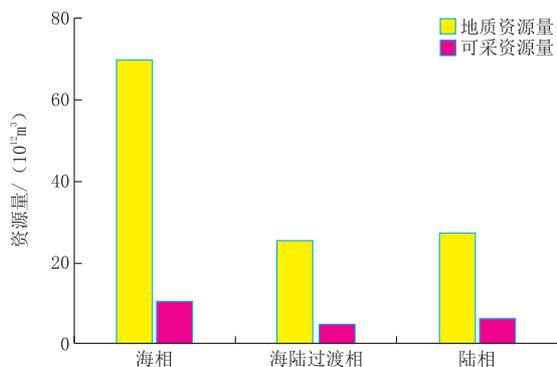


图 3 我国不同类型页岩气资源量

Fig.3 Amount of different kinds of shale gas resources in China

2.1 发展历程

可将我国页岩气发展历程分为 5 个阶段:

(1)跟踪调研阶段(2000—2004 年)。主要调研国外尤其是美国的页岩气勘探开发情况,学习北美先进的页岩气勘探开发技术。

表1 全球页岩气技术可采资源量排名

Table 1 Ranking of global recoverable shale gas resources

排名	国家	技术可采资源量/(10 ¹² m ³)	排名	国家	技术可采资源量/(10 ¹² m ³)
1	中国	31.57	6	墨西哥	15.43
2	阿根廷	22.71	7	澳大利亚	12.37
3	阿尔及利亚	20.02	8	南非	11.04
4	美国	18.83	9	俄罗斯	8.07
5	加拿大	16.23	10	巴西	6.94

(2)资源评价阶段(2005—2009年)。重点对比国内外类似页岩储层地质特征,并与国外公司对国内区块进行联合评价,如中石油与美国新田公司联合评价了威远页岩气。

(3)先导试验阶段(2010—2013年)。2010年钻成国内第一口页岩气直井——威201井压裂获气;2011年钻成国内第一口页岩气水平井——威201-H1井压裂获气;2012年钻获国内第一口具有商业价值的页岩气井——宁201-H1井;2012年11月28日焦页1HF井放喷测试产量达 20.3×10^4 m³/d,拉开了中国页岩气革命的序幕。国土资源部开展了两轮页岩气矿权招标,2011年5—7月进行了第一轮招标,4个区块,6家企业投标;2012年9—11月进行了第二轮招标,20个区块,83家企业投标。2011年12月31日页岩气被列为我国第172个独立矿种^[15]。2012年3月,国家能源局批准了四川长宁—威远页岩气示范区和滇黔北昭通页岩气示范区;2012年9月,国家能源局批准了延长陆相页岩气示范区;2013年9月,涪陵页岩气田被国家能源局批准为第4个国家页岩气示范区。2013年开展了涪陵、长宁—威远、昭通、延长页岩气田的先导试验,初步掌握了页岩气开发技术:长水平段水平井钻井技术+多段大型水力压裂技术。2013年开钻第一个“工厂化”试验平台——长宁H3平台。

(4)示范区建设阶段(2014—2015年)。在前期先导试验取得成功的基础上,开展了轰轰烈烈的示范区产能建设,到2015年底,涪陵建成了 50×10^8 m³的产能,长宁—威远建成了 20×10^8 m³的产能,昭通黄金坝YS108井区建成了 5×10^8 m³的产能。示范区产能建设目标的顺利实现,使中国成为了继美国、加拿大之后第3个掌握页岩气开发工程技术的国家,极大地提振了中国页岩气革命的信心。

(5)规模化开发阶段(2016年至今)。涪陵页岩气田于2017年底实现了 100×10^8 m³产能建设目

标,长宁—威远建成了 50×10^8 m³的产能,昭通建成了 10×10^8 m³的产能,延长陆相建成了 5×10^8 m³的产能。中石化又启动了威荣页岩气田、永川页岩气田的开发建设。

2.2 取得的成就

经过10年的努力,中国页岩气发展已经进入了规模开发阶段。目前,我国已经突破了四川盆地海相龙马溪地层,累计探明页岩气储量超过了 1.0455×10^{12} m³(参见表2)。

表2 中石油及中石化主要页岩气区块地质储量情况

Table 2 Geological shale gas reserves of PetroChina and Sinopec in the main blocks

企业	区块	含气面积/km ²	探明地质储量/(10 ⁸ m ³)
中石油	威远	225.92	1838.95
	长宁	91.17	834.64
	昭通	68.47	527.16
	小计	385.56	3200.75
中石化	涪陵	575.92	6008.14
	威荣	143.77	1246.00
	小计	719.69	7254.14
总计		1105.25	10455.00

除了中石油长宁—威远、昭通、中石化涪陵、威荣等主要页岩气区块,我国在四川盆地及周缘的丁山、永川、大足、武隆以及中扬子宜昌等地区的海相页岩气勘探也取得了新突破(参见图4)。中国石化在丁山地区的丁页4HF、5HF井五峰—龙马溪组测试分别获日产气 20.56×10^4 m³、 16.33×10^4 m³;在永川地区已完成8口井压裂,经测试日产气 $6 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4$ m³;在武隆地区的隆页2HF井五峰—龙马溪组获日产气 9.2×10^4 m³;在东胜构造带胜页2HF井勘探取得重大突破,测试产量达 32.8×10^4 m³。中国石油在大足地区的足201-H1井五峰—龙马溪组获日产气 10.56×10^4 m³。中国地质调查局在宜昌地区的鄂宜页1井下寒武统获日产气 6.02×10^4 m³。展现了良好的页岩气勘探开发前景和潜力。

建成了涪陵、长宁—威远、昭通、延长等4个国家页岩气示范区。2018年页岩气产量为 108.42×10^8 m³,并形成了3500 m以浅的页岩气开发配套工程技术,使我国成为继美国、加拿大之后第3个实现页岩气商业化开发的国家。预计2020年页岩气产量将达到 300×10^8 m³,2030年将达到 $800 \times 10^8 \sim 1000 \times 10^8$ m³。



图 4 中国南方地区页岩气勘探开发形势图

Fig.4 Shale gas exploration map in the south of China

中国首个大型页岩气田——中石化涪陵页岩气田累计探明含气面积 575.92 km², 累计探明地质储量达到 6008.14 × 10⁸ m³, 是全球除北美之外最大的页岩气田^[16]。2012 年 11 月实现了焦页 1HF 井的页岩气大发现, 2013 年 1 月, 启动开发试验井组, 2015 年 12 月, 建成了一期 50 × 10⁸ m³ 产能。2017 年 12 月, 累计建成产能 100 × 10⁸ m³。截至 2017 年底, 开钻井 401 口, 完钻井 348 口, 投产井 260 口, 2017 年产气量 60.4 × 10⁸ m³, 2018 年产气量 60.2 × 10⁸ m³。涪陵页岩气田历年产能及产量如图 5 所示。另外, 南川页岩气田 2018 年产气量 5.06 × 10⁸ m³。威荣及永川页岩气田年产气量均为 0.23 × 10⁸ m³。

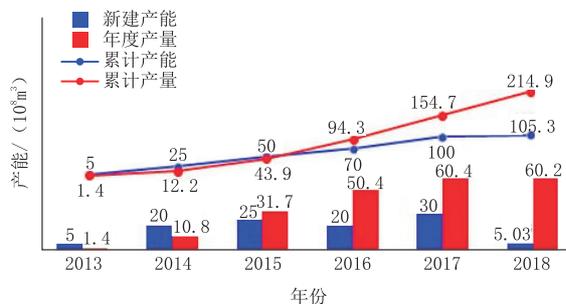


图 5 涪陵页岩气田历年产能产量

Fig.5 Productivity and production of Fuling Shale Gas Field since 2013

中石油在长宁—威远、昭通页岩气开发区, 2017 年页岩气产量达到 30.2 × 10⁸ m³, 2018 年产气量 42.7 × 10⁸ m³。形成了 3 个工业化开采区及 2 个工业化突破区。截至 2017 年底, 开钻井 328 口, 完钻井 269 口, 投产井 213 口, 目前日产能 1100 × 10⁴ m³。图 6 为中石油主要页岩气开发区分布图。

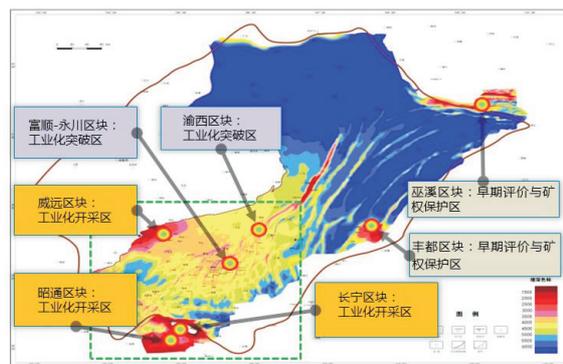


图 6 中石油主要页岩气开发区

Fig.6 Main shale gas development areas of PetroChina

3 对中国页岩气革命的思考与发展建议

3.1 中国页岩气革命还未进入快速发展阶段, 任重道远

鉴于中国页岩气革命的蓬勃发展, 有的专家乐观地认为中国页岩气革命即将或已经进入了快速发展阶段, 笔者认为我国虽不会像美国那样要经历 20

年漫长的探索阶段,但还需要5年左右的时间才能迎来快速发展的良好局面,原因如下^[17]:

(1)纵向上,五峰-龙马溪组“一层独辉”,页岩气“层层同辉”的局面尚未实现。

我国南方海相发育牛蹄塘组、五峰-龙马溪组、泥盆-石炭系、二叠系、中下侏罗统5套富有机质页岩层系,但目前只有五峰-龙马溪组一个地层获得了商业性开发,其余4个页岩层均未实现规模化商业发现。即使五峰-龙马溪组这一层,目前页岩气规模发现和开发也主要集中在小于3500 m的中浅层(资源量为 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$),而盆内3500~4500 m的深层(资源量为 $11.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$)和盆地边缘的常压有利区(资源量为 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$),资源量巨大,但开发

技术还不成熟,有待技术攻关实现商业开发。同时,海陆过渡相、陆相页岩气也尚未实现规模化商业发现和开发。

(2)横向上,主要集中在四川盆地及周缘,还未在全国形成燎原之势。

从表3的统计数据不难看出,美国的页岩气田所处的盆地面积大,最小的达1万 km^2 ,最大的超过24万 km^2 ,地质储量十分丰富,每个盆地的页岩气地质储量都在 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,有效厚度大,埋深普遍较浅。反观我国,页岩气的“星星之火”目前主要集中在四川盆地,气田面积普遍不大,最大的涪陵页岩气田也仅有500余平方千米,地质储量也远低于美国的页岩气田。

表3 中美主要页岩气区块的储层特征

Table 3 Characteristics of shale gas reservoirs in China and America

国家	气田名称	盆地面积/ km^2	地质储量/ (10^{12} m^3)	有效厚度/m	垂直深度/m	储层压力/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
美国	Barnett	12949	42.48	30~180	2000~2600	1.35~1.58
	Haynesville	23309	20.30	60~90	3450~4200	1.6~2.0
	Fayetteville	10360	14.72	20~180	445~2040	0.92~1.04
	Marcellus	246048	42.48	15~60	1370~2440	0.95~1.58
中国	涪陵	576	0.6008	55~89	2300~3500	1.4~1.7
	威荣	144	0.1246	40~85	3550~3880	1.9~2.1
	威远	226	0.1839	20~80	2000~4000	1.8~2.2
	长宁	91	0.0834		2300~4000	1.8~2.1
	昭通	68	0.0527	20~100	1000~4500	1.6~2.0
	延长陆相	611	0.1654			0.5~0.7

3.2 在现有工程技术能力下,页岩气开发成本居高不下,必须继续攻关,探寻降本增效的颠覆性技术

与美国页岩气资源有利区多处于平原地区不同,我国页岩气资源有利区多位于丘陵(45%)、山地地区(22%),而平原地区仅占20%,普遍存在生态脆弱,环保要求高,地面建设成本高,天然气管网缺乏,在现有技术能力下,页岩气实现效益开发难度大。借鉴北美勘探开发的成功经验,结合中国页岩气资源的特点,提出以下发展建议^[17-23]:

(1)借鉴北美经验,探索形成单一井场多套层系立体开发模式。

在美国 Eagle Ford、Permian 和加拿大 Montney 等盆地多采用单一井场多套层系立体开发模式,如美国 Laredo 石油公司在 Permian 盆地采用单井场同时开发4个层位的页岩油气,作业成本大大降低。借鉴北美经验,我国应积极在涪陵页岩气田探索五峰-龙马溪组两套层系或多套层系立体开发

模式,以及四川盆地侏罗系、二叠系、志留系、寒武系多套层系立体开发模式。涪陵页岩气田五峰-龙马溪组存在两套开发层系,下部储层①~③为当前开发的主要目的层,但前期完钻井水平段间距为600 m,两井水平段中间部分储层资源未能动用,需要部署加密井;上部储层③~⑨为未动用储层,已完钻的5口评价井测试日产气 $5.3 \times 10^8 \sim 28 \times 10^8 \text{ m}^3$,具有良好的开发潜力,需要部署开发水平井。因此可借鉴北美经验,探索五峰-龙马溪组两套层系单一井场立体开发钻井技术,即通过充分利用一期产建已部署的老井场平台,减少土地占用面积、地面设施的投入,采用上下两层立体开发模式,实施“井工厂”作业,降低作业成本,提高效率,实现总体效益提升。

(2)攻关超长水平井钻井技术,不断提高开发效益。

美国 Haynesville 页岩气开发井,2012年之前水平段平均长1263 m,2014-2015年水平段平均

长 2408 m,增长了 94.6%,水平段每米成本降低了 73%,桶油成本从 40 美元降至 10 美元。2016 年 5 月完成的 Purple Hayes 1H 超级水平井水平段长达 5656 m,钻井周期 17.6 d,单位进尺成本降低 20%~40%。实践证明,大幅增加水平段长能有效提高资源动用效率,国外已把超长水平井钻井技术作为降低页岩气开发成本的手段之一,因此建议开展超长水平井钻井技术研究,将目前的水平段长从 1500 m 提高到 3000 m,进一步提高开发效益。

2017 年,涪陵页岩气田开展了 3000 m 水平段钻完井技术可行性研究,同年 12 月 9 日在焦页 2-5HF 井开始探索试验,并于 2018 年 2 月 20 日完钻,完钻井深 5965 m,水平段长度 3065 m。钻井周期 74 d,优质储层穿行率 100%,是目前国内第一口水平段超过 3000 m 的页岩气水平井,创国内页岩气水平井水平段最长记录,持续引领了我国页岩气水平井钻井技术的发展^[24]。2018 年到目前,完钻的 42 口开发调整井平均水平段长由一期的 1517 m 增长为 2156 m,增加了 42.1%,其中 12 口井水平段长超过 2500 m,6 口井水平段长超过 2800 m。

(3) 广泛推广应用“一趟钻”技术,持续提高钻井效率。

“一趟钻”是集成应用设计、提速与管理一体化的钻井技术,采用“一趟钻”钻完一个开次的所有井段,可以有效缩短钻井周期。“一趟钻”技术已在美国页岩气田广泛应用。2015 年美国 CONSOL 能源公司在 Marcellus 一个井场用工厂化作业方式钻 8 口水平井,多口井实现了三开一趟钻(斜井段+水平段),钻得最快的 2 口水平井,水平段日进尺分别达到 1613.3 m/d(平均机械钻速 67.22 m/h)和 774.2 m/d(平均机械钻速 32.26 m/h),一趟钻完成的进尺最多达到 4597.6 m。2016 年美国 Eclipse 资源公司在俄亥俄州 Utica 页岩气产区钻成了一口总井深达 8244.2 m 的水平井,页岩层埋深 2000 m 左右,一趟钻完成长度为 5652.2 m 的水平段,创造了美国陆上一趟钻水平段长度新纪录。

中石化涪陵页岩气田积极探索“一趟钻”钻井技术,2018 年完钻开发调整井 12 口,一开“一趟钻”实现率 100%;二开平均趟数由之前的 8.3 次下降到目前的 6.2 次,降低了 25%,其中有 2 口井实现了二开 4 趟钻的目标;上部气层井造斜段“一趟钻”完成率 50%,水平段“一趟钻”完成率 83.33%;加密井

造斜段“一趟钻”完成率 83.33%,水平段“一趟钻”完成率 16.67%。共有 7 口井实现了水平段“一趟钻”,平均纯钻时间 123.67 h,平均进尺 1668 m,最大水平段进尺 1971 m,平均机械钻速 14.30 m/h。中石化南川气田焦页 194-4HF 井,实现三开一趟钻,进尺 2556 m,创中石化页岩气三开钻井单趟进尺最高纪录。中石油昭通 YS112H6-4 井从 3801 m 钻至 4180 m 完钻,用时 7.29 d,造斜段+水平段一趟钻完成 1985 m 进尺,水平段机械钻速达 17.3 m/h。

与美国相比,我国的一趟钻技术指标尚有很大的差距,还有很大的优化提高潜力,因此建议针对我国页岩气开发特征及工程技术现状,进一步优化“一趟钻”钻井技术,加大推广应用力度,不断提高钻井效率^[25-28]。

(4) 树立全过程降本理念,实现效益开发。

国内的井身结构采用钻头尺寸为 $17\frac{1}{2}$ in \times 12 $\frac{1}{4}$ in \times 8 $\frac{1}{2}$ in(1 in=25.4 mm,下同),套管尺寸为 $13\frac{3}{8}$ in \times 9 $\frac{5}{8}$ in \times 5 $\frac{1}{2}$ in;国外的井身结构采用钻头尺寸为 $12\frac{1}{4}$ in \times 8 $\frac{1}{2}$ in \times 6 in,套管尺寸为 $9\frac{5}{8}$ in \times 7 in \times 4 $\frac{1}{2}$ in(悬挂)。国外采用非标井身结构,减小井眼尺寸,减少套管用量 46%,成本 150 万元左右,仅为我国的一半。

国外钻井液处理存储中心站辐射区域平台,而不在平台配置,尽可能利用好钻井液材料;另外将白油基钻井液改为柴油基,基础油价降低一半;钻井液处理到位,重复利用率极高。单井钻井液费用一般不超过 200 万元,仅为我国钻井液费用的一半以下。另外开发个性化高性能水基钻井液,种类齐全,满足不同区域和性质页岩钻井需要。应用柴油基钻井液和高性能水基钻井液(约 30%的井使用水基)可以控制单井钻井液费用低于 200 万元^[29-30]。

国外在钻前工程中,不建设永久性的砖混结构的池体(包括污水池、清水池和岩屑池),而是采用可重复利用的移动式支架池体,它是用很厚很结实的塑料布铺成的。钻完井后,既可以拆掉移动走,尽最大程度地恢复井场原貌,又可以重复利用这种池体,极大地降低了钻井池体的建设费用。

完井阶段,试验应用了“钻刮通洗一体化”完井工具,与常规小钻杆钻塞、刮管、通井、洗井相比,将 3 趟钻压缩为 1 趟钻,可节约时间 40 h 以上。另外,一般使用原钻机,完成通井、刮井、洗井、测声幅、试

压等工序,一般需要7 d,而采用连续油管完井技术,可以替代钻机,2 d就可完成通井、刮井、洗井、测声幅、试压等工序,施工效率大为提高,因此建议推广应用连续油管完井技术。

(5)优化管理措施,提高生产效率,实现全要素降本。

麦肯锡(McKinsey)研究显示,低油价下油气公司采取7种方式来提高工程项目的生产效率,包括监管变更、合作与外包、设计与建造、供应链管理、现场管理优化、新技术、管理能力构建等,若综合运用上述手段,生产效率可以提高50%~65%。其中新技术的贡献率为14%~15%,管理措施优化的贡献率可达35%~41%。因此除了重视新技术的应用外,应转化观念,强化优化现场管理措施。

钻井施工,一般都是用钻机打导眼,需要3~5 d。近年来,一些单位进行了有益的尝试,采用工程钻机,在钻前工程施工时也一并把导眼钻成,钻井队直接打一开,这样就减少了打导眼占用钻机的时间,提高了钻井效率。

中石油研究形成了精细化单井作业计划,该计划具体到每趟钻、每个工序、每个时间节点,钻头、螺杆及钻井参数都进行了针对性优化,每道工序都做到无缝衔接,极大地提高了钻井施工效率。建议借鉴中石油模板,大力推进精细化单井作业计划。

4 结语

由于地质条件及工程因素的影响和制约,中国页岩气革命还未进入快速发展阶段,仍任重而道远,可借鉴北美经验,探索单一井场多套层系立体开发模式,开展超长水平段页岩气水平井钻井技术研究与推广,广泛推广应用“一趟钻”技术,树立全过程降本理念,优化管理措施,提高生产效率,实现全要素降本,尽早迎来中国页岩气革命的快速发展阶段,助推中国梦。

参考文献(References):

[1] 李鹭光,王红岩,刘合,等.天然气助力未来世界发展——第27届世界天然气大会(WGC)综述[J].天然气工业,2018,38(9):1-9.
LI Luguang, WANG Hongyan, LIU He, et al. Natural gas fueling the world's future: A brief summary from the 27th World Gas Conference (WGC) [J]. Natural Gas Industry, 2018,38(9):1-9.

[2] S. L. Sakmar. Shale gas developments in north America: an overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry[C]// SPE 144279,2011.

[3] Aaron Padila. Social responsibility & management systems: evaluating performance for shale gas development[C]// SPE 156728, 2012.

[4] Z. Dong, S. A. Holditch, et al. Global unconventional gas resource assessment[C]// SPE 148365,2011.

[5] 曾义金.页岩气开发的地质与工程一体化技术[J].石油钻探技术,2014,42(1):1-6.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(1):1-6.

[6] 路保平.中国石化页岩气工程技术进步及展望[J].石油钻探技术,2013,41(5):1-8.
LU Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(5):1-8.

[7] 董大忠,高世葵,黄金亮,等.论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J].天然气工业,2014,34(12):1-15.
DONG Dazhong, GAO Shikui, HUANG Jinliang, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(12):1-15.

[8] 张所续.世界页岩气勘探发现现状及我国页岩气发展展望[J].中国矿业,2013,22(3):1-3,11.
ZHANG Suoxu. The exploration and development situation of world shale gas and development of China's shale gas outlook [J]. China Mining Magazine, 2013,22(3):1-3,11.

[9] 王世谦.中国页岩气勘探评价若干问题评述[J].天然气工业,2013,33(12):13-29.
WANG Shiqian. Shale gas exploration and appraisal in China: problems and discussion[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(12):13-29.

[10] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2):324-336.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(2):324-336.

[11] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(2):166-178.

[12] 门晓溪,韩志辉,王磊.页岩气资源勘探开发历史及现状[J].新疆石油地质,2018,39(3):372-376.
MEN Xiaoxi, HAN Zhihui, WANG Lei. History and current situation of shale gas exploration and development[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(3):372-376.

[13] 梁晓霏,史林渠.页岩气使全球石化产业中心重新向美国偏移[J].中外能源,2011,16(12):1-9.
LIANG Xiaofei, SHI Linqu. Shale gas shifts the world's petrochemical industry center to US Again[J]. Sino-global Energy, 2011,16(12):1-9.

- [14] 袁立明.世界页岩气的开发与利用[J].地球,2012(5):100—102.
YUAN Liming. Development and usage of shale gas in the world[J]. The Earth, 2012(5): 100—102.
- [15] 刘航.页岩气国内外研究现状[J].石化技术,2018,25(3):123.
LIU Hang. Research status of shale gas at home and abroad [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(3):123.
- [16] 马忠玉,肖宏伟.能源革命视阈下我国页岩气产业发展战略研究[J].中国能源,2017,39(11):14—18.
MA Zhongyu, XIAO Hongwei. Study on the development strategy of shale gas industry in China from the perspective of energy revolution[J]. Energy of China, 2017, 39(11): 14—18.
- [17] 潘军,刘卫东,张金成.涪陵页岩气田钻井工程技术进展与发展建议[J].石油钻探技术,2018,46(4):9—15.
PAN Jun, LIU Weidong, ZHANG Jincheng. Drilling technology progress and recommendations for the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(4):9—15.
- [18] 牛新明.涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J].石油钻探技术,2014,42(4):1—6.
NIU Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(4):1—6.
- [19] 周贤海.涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J].石油钻探技术,2013,41(5):26—30.
ZHOU Xianhai. Drilling & completion techniques used in shale gas horizontal wells in Jiaoshiba Block of Fuling Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(5):26—30.
- [20] 艾军,张金成,臧艳彬,等.涪陵页岩气田钻井关键技术[J].石油钻探技术,2014,42(5):9—15.
AI Jun, ZHANG Jincheng, ZANG Yanbin, et al. The key drilling technologies in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(5):9—15.
- [21] 郭旭升,胡东风,魏志红,等.涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J].中国石油勘探,2016,21(3):24—37.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEI Zhihong, et al. Discovery and exploration of Fuling Shale Gas Field[J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(3):24—37.
- [22] 王建华,刘杰,张进.页岩气开发钻井完井技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):1—5.
WANG Jianhua, LIU Jie, ZHANG Jin. Complete drilling and completion technology for shale gas development[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(10):1—5.
- [23] 臧艳彬,白彬珍,李新芝,等.四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(5):20—24.
ZANG Yanbin, BAI Binzhen, LI Xinzhi, et al. Challenges of shale gas horizontal well drilling in Sichuan Basin and its vicinity and the technical counter-measures[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(5):20—24.
- [24] 杨海平,游云武.焦页2-5HF长水平井钻完井关键技术[J].钻采工艺,2018,41(3):5—8.
YANG Haiping, YOU Yunwu. Critical drilling technology for drilling super-long horizontal well JY2-5HF[J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(3):5—8.
- [25] 张金成.涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):1—8.
ZHANG Jincheng. Optimal and fast drilling technology for horizontal wells in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(7):1—8.
- [26] 张金成,孙连忠,王甲昌,等.“井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用[J].石油钻探技术,2014,42(1):20—25.
ZHANG Jincheng, SUN Lianzhong, WANG Jiachang, et al. Application of multi-well pad in unconventional oil and gas development in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(1):20—25.
- [27] 周贤海,臧艳彬.涪陵地区页岩气山地“井工厂”钻井技术[J].石油钻探技术,2015,43(3):45—49.
ZHOU Xianhai, ZANG Yanbin. Application of “Well Factory” drilling technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(3):45—49.
- [28] 陈平,刘阳,马天寿.页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望[J].石油钻探技术,2014,42(3):1—7.
CHEN Ping, LIU Yang, MA Tianshou. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(3):1—7.
- [29] 王显光,李雄,林永学.页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用[J].石油钻探技术,2013,41(2):17—22.
WANG Xianguang, LI Xiong, LIN Yongxue. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(2):17—22.
- [30] 方静,肖绪玉.新型水基钻井液体系在页岩气钻井中应用探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):96—102.
FANG Jing, XIAO Xuyu. Discussion on application of new water-based drilling fluid system in shale gas drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(7):96—102.

(编辑 王建华)