

页岩气开发技术与策略综述

李武广 杨胜来 殷丹丹 娄毅 郭瑾 孟虎

中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室 北京 102249

摘要:

页岩气是一种储量巨大的非常规天然气,但是页岩气储藏层结构复杂,多为低孔、低渗型,开发技术要求很高,需要大量的技术资金和人员投入。重点介绍了国内外页岩气勘探开发技术,主要包括储层评价技术(测井和取心)、水平井增产技术(多分支井水平井和对接连通水平井)、射孔优化技术以及压裂增产技术;分析了国内在页岩气研究开发中存在的主要问题,指出了当前页岩气开发技术的发展趋势。

关键词:

页岩气开发;储层评价;水平井增产;射孔优化;压裂增产

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)01-0034-04

0 前言

近几十年来,页岩气的开发走过了漫长曲折的道路。页岩气的研究和勘探开发最早始于美国,1821 年美国东部第一口页岩气井开钻,20 世纪 20 年代开始步入规模化生产,20 世纪 70 年代页岩气勘探开发区扩展到美国中西部地区。20 世纪 90 年代,在政策、价格和开发技术进步等因素的推动下,页岩气成为石油天然气产业重要的勘探开发目标和领域。截至 2006 年,美国有页岩气井超过 40 000 口,页岩气年生产量为 $311 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占该国年天然气总产量的 6%。2007 年美国页岩气生产井近 42 000 口,页岩气年产量为 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占该国年天然气总产量的 8%。同时参与页岩气开发的石油企业从 2005 年的 23 家发展到 2007 年的 64 家,见图 1。据预测,美国页岩气资源量超过 $28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前美国和加拿大是页岩气规模开发的两个主要国家,2009 年美国页岩气产量接近 $1 000 \times 10^8 \text{ m}^3$,

超过我国常规天然气的年产量。页岩气快速勘探开发使美国天然气储量增加了 40%, 预计 2010 年页岩气产量将占全美天然气产量的 15% 以上^[1-2]。

目前,除美国和加拿大外,澳大利亚、德国、法国、瑞典、波兰等国家也开始了页岩气的研究和勘探开发。近年来,随着社会对清洁能源需求的不断扩大,天

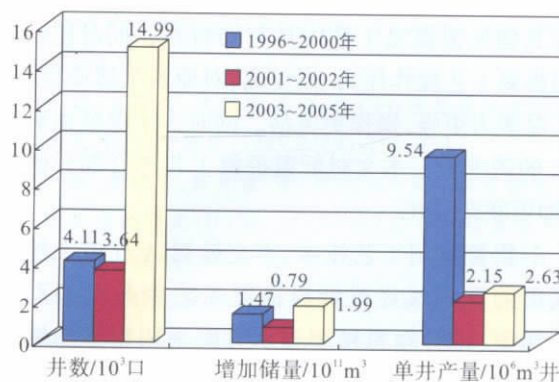


图 1 美国近年来页岩气储量增长情况图

收稿日期:

2010-11-03

基金项目:

国家自然科学基金资助项目“超深层油气藏岩石物性垂向分布规律及渗流特征研究”(50874114)

作者简介:

李武广(1987-),男,甘肃庆阳人,中国石油大学(北京)在读博士研究生,2007年毕业于东北石油大学,主要从事油气田开发工作。

然气价格的不断上涨、页岩气地质认识的不断提高、水平井与压裂技术水平的不断进步,页岩气勘探开发正由北美向全球扩展。

我国页岩气资源潜力大,但勘探开发处于“空白”状态。我国页岩气富集地质条件优越,从现有资料看,除分布在四川、鄂尔多斯、渤海湾、松辽、江汉、吐哈、塔里木和准噶尔等含油气盆地外,在我国广泛分布的海相页岩地层、海陆交互相页岩地层及陆相煤系地层也都有分布。据估算,我国页岩气可采资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 与美国大致相当。川南、川东、渝东南、黔北、鄂西等上扬子地区是我国页岩气主要远景区之一,以四川盆地为例,仅评价的寒武系和志留系两套页岩,页岩气资源量就相当于该盆地常规天然气资源量的 1.5~2.5 倍,见图 2。受国外成功实例的启发,且为了满足安全、环保、能源接替的需要,我国于 90 年代向页岩气开发领域进军。但是由于受地质条件以及开发技术的限制,一直没有形成大的开发规模^[3]。

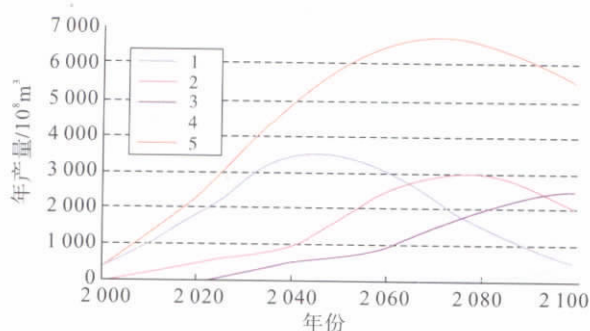


图 2 中国页岩气产量预测图

注:1.常规天然气;2.煤层气、致密砂岩气、生物气、无机气;3.页岩气、水溶气;4.天然气水合物;5.天然气总量

1 国内外页岩气勘探开发技术

页岩气区别于常规天然气的特征之一是以吸附和自由气的形式存在于页岩之中。由于页岩的致密性,具有商业开发价值的页岩气藏储层厚度都比较大。自从页岩气产业化以来,国内外都在储层评价、水平井增产、射孔优化和压裂增产技术上不断创新以寻求最佳的经济效益^[4]。

1.1 储层评价技术

页岩气储层评价的两种主要手段是测井和取心。应用测井数据,包括 ECS (Elemental Capture Spectroscopy) 来识别储层特征。单独的 GR 不能很好地识别出粘土,干酪根的特征是具有高 GR 值和低 Pe 值。成像测井可以识别出裂缝和断层,并能对页岩进行分层。声波测井可以识别裂缝方向和最大主应力方向,进而为气井增产提供数据。岩心分析主要是用来确定

孔隙度、储层渗透率、泥岩的组分、流体及储层的敏感性,并分析测试 TOC 和吸附等温曲线。

1.2 水平井增产技术

页岩气储层的渗透率低,气流阻力比传统的天然气大得多,并且大多存在于页岩的裂缝中,为了尽可能的利用天然裂缝的导流能力,使页岩气尽可能多的流入井筒,因此开采可使用水平钻井技术,并且水平井形式包括单支、多分支和羽状。一般来说,水平段越长,最终采收率就越高。

水平井的成本比较高,但其经济效益也比较高,现代钻井技术使水平井的水平段在钻探过程中比较容易控制,因此页岩气可以从相同的储层但面积大于单直井的区域流出。在采用水平井增产技术过程中,水平井位与井眼方位应选在有机质富集,热数度比较高、裂缝发育程度好的区域及方位。水平井,见图 3。

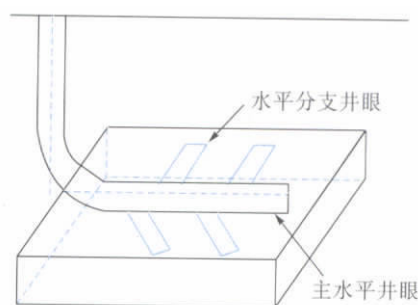


图 3 页岩气分支水平井示意图

1.3 射孔优化技术

定向射孔的目的是沟通裂缝和井筒,减少井筒附近裂缝的弯曲程度,进而减少井筒附近的压力损失,为压裂时产生的流体提供通道。通过大量页岩气井的开发实践,开发人员总结出定向射孔时应遵循的原则,即在射孔过程中,主要射开低应力区、高孔隙度区、石英富集区和富干酪根区,采用大孔径射孔可以有效减少井筒附近流体的阻力。在对水平井射孔时,射孔垂直向上或向下^[5]。

1.4 压裂增产技术

水力压裂可以使储层产生密集的裂缝网络,进而提高储层渗透率,使地层中的天然气更容易流入井筒。进行压裂前,应先对井(竖直井或水平井)进行测试,以确保井能够承受压裂的压力和注入泵率。页岩气开采过程中可采用多种压裂方式:重复压裂、多层压裂、清水压裂、同步压裂。重复压裂主要是在不同方向上诱导产生新裂缝进而增加裂缝网络,可有效改进单井产量与生产动态特征;多层压裂多用于垂直堆叠的致密地层。清水压裂采用添加一定减阻剂的清水作为压裂液。这种压裂液的主要成分是水,以及少量

的减阻剂、粘土稳定剂和表面活性剂。清水压裂在低渗透气藏中能取得更好的效果,该技术在不减产的前提下能节约30%左右的成本,而且清水压裂也很少需要清理,且可提供更长的裂缝,并将压裂支撑剂运至裂缝网络。同步压裂是指同时对两口或两口以上的井进行压裂压力液及支撑剂在高压下从一口井沿最短距离向另一口井运移,这样就增加了裂缝网络的密度及表面积,从而快速提高页岩气井的产量^[6]。

2 我国页岩气开采存在的主要问题

综合国内外研究现状,我国在页岩气的基础研究还很很成熟。一是技术问题。页岩气藏物性差,渗透率极低,开发技术要求高,难度大。而且我国页岩气普遍埋藏较深,进一步增加了开发难度。例如四川盆地寒武统页岩气层埋深在2 000~3 500 m,而美国五大页岩系统埋深在800~2 600 m。目前,我国在长距离多分支水平井、超致密储层分段压裂改造技术方面落后,并且没有研制出有效保护页岩储层的低伤害压裂液体系;不同页岩储层地质条件下水力压裂裂缝展布特征不够清晰,页岩储层压裂方式有待于改进;对多分支水平井页岩气生产过程中的页岩芯产出认识程度较低,多分支水平井控制的影响关键因素及作用机制不清等直接制约了我国页岩气的开发和增产。

目前,我国急需开发适用于我国地质条件的先进的生产工艺技术,主要包括以下几方面:定向水平井技术、低成本空气钻井、洞穴完井技术、压裂技术、页岩储层保护技术、页岩气藏数值模拟技术等。我国目前页岩气生产规模比较小,没有形成从钻井、完井、生产到集输的一体化程序。要选择适合我国的页岩气开发技术,首先要了解我国各地区页岩储层的特性(如粘土矿物成分及含量、脆性等),在借鉴国外页岩气开发先进工艺技术的基础上,优化出适应性较强的页岩气开发技术。

通过国内外页岩储层层位对比、国内外页岩储层特性对比等,发现我国页岩气富集储层埋深比美国大,厚度相当;页岩储层的镜质组反射率、总有机质含量、孔隙度、渗透率等指标相当。国内水平井钻井技术、欠平衡钻井技术、射孔完井、储层改造、气举排水等技术发展已相对完善。

二是政策问题。页岩气属于非常规低品位天然气资源,开发投资较大,风险大,需要积极有效的政策支持。目前,我国缺乏鼓励开发包括页岩气在内的非常规油气资源的政策体系。政府应对非常规能源开发实施税收补贴和鼓励政策,应设立专门的非常规油气资

源研究基金,以促进页岩气的开发和基础研究。

三是市场条件和基础设施问题。目前我国应建立健全的天然气市场体系以及四通八达的天然气管网和城市供气网络,这样可以减少页岩气开发在末端环节的前期投入,可以降低市场风险,迅速实现页岩气开发的商业化和商品化,提高页岩气的商业价值。此外,政府应该进行大量区域性和基础性页岩气资源调查、评价和研究工作,特别是对重点盆地和重点地区开展页岩气资源评价,进而促进页岩气资源勘探开发^[7]。

3 新技术展望

3.1 加强页岩气资源战略调查

根据我国页岩分布和页岩气富集的地质条件,在全国范围内开展页岩气地质调查。充分利用已有的地质资料,有针对性地部署实物工作量,通过调查,进一步查明我国页岩气基础地质背景和条件,预测富含有机质页岩发育区,预测页岩气资源潜力与分布。同时,获取系统的资料数据,编制系列图件,建成页岩气地质调查数据资料集成系统,形成系列调查研究成果。优选页岩气富集有利目标区和勘探开发区。

建立页岩气资源战略调查和勘探开发先导试验区。同时,着力解决页岩气重大地质问题和关键技术方法,形成页岩气资源技术标准和规范。

3.2 推进页岩气勘探开发

把落实资源并实现储量稳步增加放在首位。南海相页岩地层、北方湖相页岩地层和广泛分布的海陆交互相地层等将是今后页岩气勘探的主要领域。四川、鄂尔多斯、渤海湾、松辽等八大盆地页岩气富集条件优越,是未来页岩气勘探的主要对象,含油气盆地之外广泛分布的页岩也是重要的勘察目标。近期应以川南、川东南、黔北、渝东南、渝东北、川东、渝东、鄂西为重点,加大勘探力度,加快勘探步伐,争取获得重大进展,提交页岩气储量,发现大气田,逐步加强页岩气开发^[8]。

3.3 加强页岩气地质理论和储层物性研究

系统研究我国页岩气地质理论。在分析我国页岩气地质理论研究现状的基础上,重点研究我国页岩的发育情况和页岩气的富集模式,系统研究我国页岩气资源分布规律、资源潜力和评价方法参数体系等。建立符合我国页岩气特点的地质理论体系。通过近些年不断探索,尽管我国页岩气基础地质研究取得了一定进展,然而针对我国地质特点的页岩气地质理论还不成熟。应结合目前起步的页岩气基础地质、勘探开发研究,并尽快启动钻井、完井地质的研究,进而建立符

合我国页岩气特点的且对我国页岩气资源战略调查和勘探开发具有指导意义的较为完整的中国页岩气地质理论体系^[9]。

3.4 提高页岩气勘探开发技术水平

完善和创新页岩气地质、地球物理、地球化学、钻探完井和压裂等技术方法,形成多学科、多手段的综合勘探技术方法体系,确保勘探目标的落实和顺利完成。针对页岩气特点,引进、吸收、提高、创新页岩气储层评价技术、射孔优化技术、水平井技术和压裂技术。

构筑支撑页岩气勘探开发的技术体系。确定我国页岩气勘探开发技术攻关方向和重点,瞄准国际先进或领先水平,强化科技攻关,建立页岩气关键技术、核心技术、重大先导、推广技术、引进技术等分层次的技术研发和应用保障体系。积聚力量,攻坚克难,逐步由技术引进向自主创新转变,推进原始创新,力争跨越关键技术和核心技术门槛,提高页岩气勘探开发技术水平和竞争力^[10]。

3.5 加强现有页岩气资料的集成利用

规范页岩气地质资料采集与汇交。依法开展页岩气原始和实物地质资料的汇交,严格规范新形成页岩气地质资料的汇交工作。建立页岩气地质资料数据采集、加工、处理和存储机制,推进页岩气地质资料的数字化,实现页岩气地质资料数据的统一、协调和规范管理。

建设页岩气地质资料信息共享和社会化服务体系。建立健全页岩气地质资料数据管理和服务工作新机制,形成完善的页岩气地质资料汇交、交换和服务等相关技术标准体系。依法强化对页岩气地质资料的管理和公共服务。建立页岩气地质资料管理与社会化服务体系,提高页岩气地质资料社会化利用效益,为政府资源管理和企业及社会提供服务^[11]。

3.6 造就页岩气资源战略调查和勘探开发人才队伍

培养页岩气资源战略调查和勘探开发人才。加强人才培养,择优选拔具有实际工作经验、组织管理能力和业务能力较强的中青年专家担任项目负责人,通过页岩气资源战略调查和勘探开发,在全国培养一批领军人才和业务骨干。建立页岩气资源战略调查多学科交叉的科技创新团队,在全国逐步形成众多的页岩气战略调查和勘探开发队伍。

开展页岩气资源战略调查和勘探开发业务培训。采取多种形式,开展页岩气地质理论和技术交流,提高理论技术水平和业务能力。依托页岩气资源战略调查项目和勘探开发工程,积极开展形式多样的页岩气技术和业务培训^[12]。

4 结论

a)页岩气藏物性差,渗透率极低,开发技术要求高,难度大。我国页岩气普遍埋藏较深,进一步增加了开发难度,但储量大,开采寿命长,生产周期长,可采用独特的开采方式来发挥其潜力。

b)水平井技术是页岩气开发采取的方式之一,尤其是多分支和羽状井可有效增加气体的泄流面积,提高页岩气的采收率。

c)压裂增产技术是页岩气开采的另一种方式。如今发展起来的清水压裂、多层压裂、重复压裂及同步压裂技术结合室内实验和测井技术,使得页岩气具有更大的发展潜力。

d)就当今世界能源问题和技术进步来看,页岩气在未来有可能成为能源供应的一个重要来源。

参考文献:

- [1] Scott L, Daniel M, Kent A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin North-central Texas: Gas-shale Play with Multi-trillion Cubic Foot Potential [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [2] Kent P, John L. Unconventional Gas Reservoirs—Tight Gas, Coal Seams and Shale. Working Document of the NPC Global Oil and Gas Study[R]. Made Available July 2007, 18.
- [3] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 潘继平. 页岩气开发现状及发展前景 [J]. 国际石油经济, 2009, 11(2): 12-15.
- [5] 安晓璇, 黄文辉, 刘思宇, 等. 页岩气资源分布、开发现状及展望[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 103-109.
- [6] 钱伯章, 朱建芳. 页岩气开发的现状与前景 [J]. 天然气技术, 2010, 4(2): 11-14.
- [7] 潘仁芳, 黄晓松. 页岩气及国内勘探前景展望[J]. 中国石油勘探, 2009, 19(2): 1-5.
- [8] 蒲泊伶, 包书景, 王毅. 页岩气成藏条件分析[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-39.
- [9] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业, 2009, 33(5): 67-71.
- [10] 张抗, 谭云冬. 中国急待研究开发的天然气新类型——页岩气[J]. 天然气工业, 2009, 35(4): 121-125.
- [11] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009, 1-100.
- [12] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域[J]. 天然气工业, 2007, 32(11): 17-21.

CH₄-CO₂ Reforming Reaction Dynamics Mechanism and Catalyst Reformation

Long Wei, Xu Wenyuan (Traffic University of East China Dept. of Chemistry and Chemical Engineering, Nanchang, Jiangxi, 330013, China) **NGO, 2011, 29(1): 29-33**

ABSTRACT: Methane and carbon dioxide reforming reaction is a contemporary research hotspot, microscopic reforming reaction dynamics mechanism has compensated for existing controversial differences. Selection of catalysts, carrier effect, adjuvant effect and anti-carbon de-position property are the key factors affecting the reaction. Through microcosmic characterization of catalyst in experiment, comparatively analyzed and resolved is the catalyst deactivation due to carbon deposit and largely improved and expanded are the activity center, carrier and adjuvant.

KEYWORDS: Methane and carbon dioxide reforming; Catalyst; Reaction mechanism; Deactivation; Adjuvant; Carbon deposit

OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT

Development Technology and Strategy of Shale Gas

Li Wuguang, Yang Shenglai, Yin Dandan, Lou Yi, Guo Jin, Meng Hu (Petroleum Engineering Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China) **NGO, 2011, 29(1): 34-37**

ABSTRACT: Shale gas is a kind of unconventional natural gas with enormous reserves and complex reservoir structure and its development needs high technology, massive fund and a lot of personnel. Mainly introduced are its exploration and development technologies at home and abroad, such as reservoir evaluation technology (logging and coring technology), stimulation technology for horizontal wells (multi-branch and connected horizontal wells), perforating optimization technology and fracturing stimulation technology. Analyzed are main problems which exist in shale gas research and development in China and forecast are development trends of shale gas development technology at present.

KEYWORDS: Shale gas development; Reservoir evaluation; Horizontal well stimulation; Perforating optimization; Fracturing stimulation

Shale Gas Reservoir Fracturing Technology and Analysis on Adaptability in China

Wang Wenxia, Li Zhiping (China University of Geosciences(Beijing)Energy Institute, Beijing, 100083, China)

Huang Zhiwen (Petroleum Exploration&Production Research Institute, SINOPEC, Beijing, 100083) **NGO, 2011, 29(1): 38-41**

ABSTRACT: At present, shale gas research, exploration and development in China is still at the exploratory stage and shale gas research, exploration and development in America has entered into mass rapid development stage. By using such foreign shale gas reservoir fracturing technologies for reference as hydraulic fracturing, horizontal well subsection fracturing and comprehensive fracture detection technology, in combination of shale gas reservoir characteristics of Sichuan Basin in China and existing fracturing foundation, analyzed is the adaptability of shale gas reservoir fracturing in China and described are constraint conditions of fracturing. It is believed that theoretical research shall be strengthened at the same time of introduction of foreign technologies so that shale gas reservoir development in China can enter into a new stage of development and effective development results can be achieved.

KEYWORDS: Shale gas reservoir; Fracturing technology; Adaptability; Theoretical research

Numerical Well Test Analysis on Testing Information of Double Permeability Medium Reservoir Swabbing Well

Wang Jinru, Wang Xinhai, Jiang Yong (Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources under the Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China) **NGO, 2011, 29(1): 42-44**