

美国 Eagle Ford 页岩气开发 对我国页岩气勘探开发的启示

周守为, 姜伟, 张春阳, 范白涛

(中国海洋石油总公司, 北京 100010)

[摘要] 据估计, 我国的页岩气可采储量高达 20 万亿~36 万亿 m^3 , 虽然我国页岩气储量评估处于初级阶段, 但仍然可以肯定我国是页岩气资源丰富的国家之一, 如果都能开发, 按当前的天然气年产量计算, 可以开发 200 多年。目前国内外多家企业聚焦中国, 逐鹿页岩气, 页岩气有望成为我国常规能源替代品, 页岩气的勘探开发必将对我国乃至世界能源格局产生重大影响。但是由于页岩气储层致密, 渗透率低至纳达西级, 若不采取特殊的增产措施难以实现商业开发。美国是目前唯一实现页岩气商业开采的国家, 技术和商业模式都相当成熟, 中海石油斥资 10 多亿美元收购了美国页岩气主产区 Eagle Ford 33.3% 的股份, 该地区页岩气地质储量高达 6 000 亿 m^3 , 开发前景广阔。为提升我国页岩气总体水平, 笔者率领技术专家深入考察了美国 Eagle Ford 页岩气项目, 增进了对水平钻井与分段压裂等关键技术的了解, 同时分析了相应扶持政策, 对中国页岩气的勘探开发具有重要的参考价值。

[关键词] Eagle Ford; 页岩气; 勘探开发; 启示

[中图分类号] TE1; TE3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)06-0016-06

1 前言

据统计, 2010 年美国页岩气的总产量达到了 1 378 亿 m^3 ^[1], 占到该国天然气总产量的 23%, 得益于页岩气这一“生力军”, 美国的能源供应压力得到了极大缓解。原本属于天然气进口国的美国, 戏剧性地逆转成为潜在的天然气出口国。位于德州西南部的 Eagle Ford 是美国页岩气的主产区, 多家公司勘探证实该区页岩气资源丰富, 估计原始地质储量达 6 000 亿 m^3 , 中海石油斥资 10 多亿美金收购该区块 33.3% 的股权(见图 1), 为我国页岩气的发展走出国门开创了先河。

页岩气开发的意义不仅在于充当常规能源的替代品, 更在于从根本上拓展了储层概念, 突破了资源禁区。随之而来的水平井多级压裂技术对解放储藏, 释放产量效果极其显著。中海油从 10 年前就将

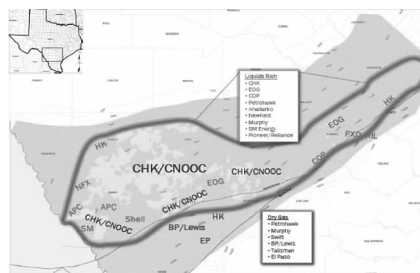


图 1 Eagle Ford 页岩气区块图
Fig. 1 Eagle Ford shale gas block

多支压裂适度出砂技术应用于海上稠油油田的开发, 其技术原理与水平井多级压裂技术大同小异, 将页岩气的水平井多级压裂技术和海上油气田常用的多支压裂适度出砂技术相结合, 既可大幅度提高海上三低油气藏、稠油油藏的采收率^[2,3], 也可为我国页岩气开发作一些技术储备。

[收稿日期] 2012-04-07

[作者简介] 周守为(1950—), 男, 四川南充市人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 研究方向为海洋油气田开发工程;

E-mail: zhoushw@cnooc.com.cn

2 页岩气资源及分布概况

页岩气资源在全球分布广泛,主要分布于北美、中亚、中国、中东、北非和非洲南部等国家和地区。根据 2011 年美国能源信息署 (Energy Information

Administration, EIA) 的最新预测,全球共有 32 个国家,48 个盆地含有页岩气资源,初步评估资源分布形势如图 2 所示。全球的页岩气地质储量总和约为 623 万亿 m^3 ,可采储量约为 163 万亿 m^3 ,全世界各地区页岩气地质储量和可采储量统计数据见表 1。

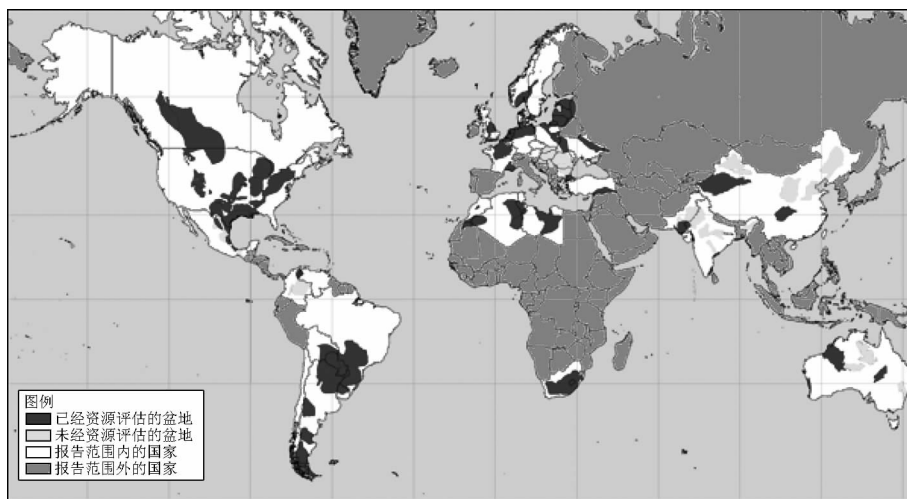


图 2 全球页岩气资源分布图(据 EIA 2011 年统计)

Fig. 2 Worldwide shale gas resources distribution (according to 2011 statistics of EIA)

表 1 全球页岩气地质储量和可采储量统计表
(据 EIA 2011 年统计)

Table 1 Worldwide shale gas geological reserves and recoverable reserves (according to 2011 statistics of EIA)

大洲	地质储量/万亿 m^3	可采储量/万亿 m^3
北美	109.189 6	30.270 66
南美	129.379 5	34.688 08
欧洲	73.255 56	17.669 68
非洲	112.191 2	29.506 11
亚洲	160.301 4	39.756 79
大洋洲	39.105 5	11.213 45
总计	623.422 7	163.104 8

我国各地质时期的页岩气分布广泛,资源量十分丰富,开发潜力巨大。据美国能源信息署 2011 年 4 月发布的数据,我国 14 个盆地中的 25 个页岩构造含有页岩气资源,地质储量达 100 多万亿 m^3 ,可采储量达 20 万亿~36 万亿 m^3 ,如果都能开发,按当前的天然气年产量计算,可以开发 200 多年。

根据沉积环境划分,可将我国的富有机质页岩分为:海相页岩、海陆交互相页岩以及陆相页岩三大类,图 3 为三大类页岩沉积相的分布图^[4]。分布图

总体呈现出南北不同的鲜明特征:南方以海相泥页岩为主,北方以湖相泥页岩为主;南方以古生界为主,北方以中生界为主。如南方地区的震旦统陡山沱组页岩、下寒武统筇竹寺组页岩;北方地区的松辽盆地白垩统青山口组泥岩、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组张家滩页岩等,可见我国的页岩气主要分布在以往未被重视的地区中,具有极高的开发潜力。

3 美国页岩气评价标准分析

页岩气藏是典型的自生自储型气藏,对页岩气进行储层评价除了需要常规物性参数以外,还应考虑有机质丰度、岩石脆性度等特殊参数。通过对美国 Eagle Ford 页岩气项目的考察,了解美国 Eagle Ford 页岩气储层评价标准表(见表 2),此标准在一定程度上代表了美国页岩气的评价标准。判断页岩油气藏是否具有经济性在满足以上标准的基础上,对于分布面积广、埋藏深度适中、围岩条件有利于分段压裂的气藏应优先开发。利用此标准,也对四川盆地古生界龙马溪组页岩储层进行对比评价,认为龙马溪组该层段的海相黑色页岩具有勘探开发价值。对于美国标准,我国可以参考,但我国页岩气储

层特性、评价的经济指标和美国都不一样,因此应建

立自己的评价标准。

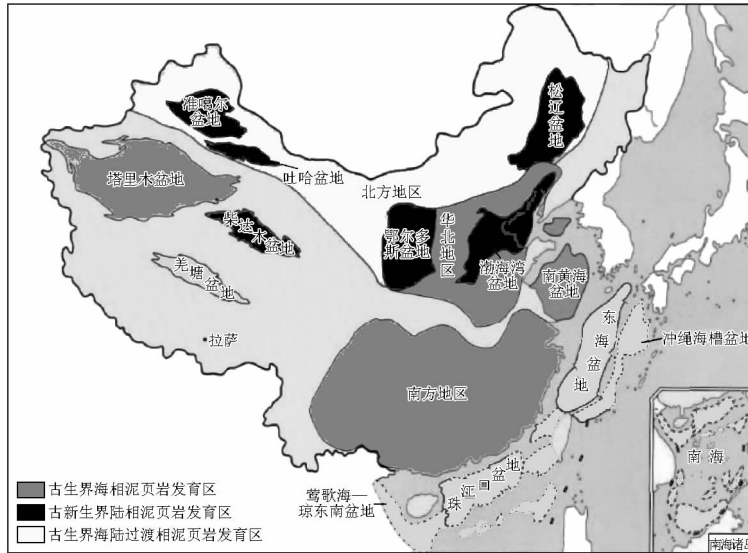


图3 中国三大类页岩沉积相分布图(据邹才能 2010 年统计)

Fig. 3 Three types of shale sedimentary facies distribution in China (according to 2010 statistics of Mr. Zou Caineng)

表2 美国页岩气储层评价标准表

Table 2 Shale gas reservoir evaluation standard in America

项目	关键评价参数	基本要求
有机质丰度	总有机碳含量(TOC)/%	>2
	热成熟度(R_o)/%	>1.1, 处于生气窗
无机矿物	石英或方解石含量/%	>40
	粘土矿物含量/%	<35
物性	渗透率 K / mD	> 10^{-4}
	含水饱和度/%	$S_w < 40$
岩石力学	泊松比 μ	<0.25
	杨氏模量 E / MPa	>20 000
测井响应特征	高自然伽马/ API	约 50 ~ 120
	高电阻率值(反应成熟度)/ohmm	>30
	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	<2.58
	高中子孔隙度(总有机碳含量)	>0.24 v/v
厚度	页岩厚度 h / m	>30

4 美国页岩气开发技术要点

页岩气的开发需要先钻直井到达目的层上方,再钻水平井在目的层内部延伸,尽量多的钻遇高碳页岩,最后实施分段压裂获得纵横交织的人工裂缝,才能获得一定规模的页岩气,因此页岩气的开发主要依赖水平井和分段压裂两项关键技术。美国页岩

气大获成功主要得益于这两项技术的突破,根据 Eagle Ford 项目的成功经验,水平井钻井与分段压裂技术的要点有以下几方面。

4.1 页岩储层水平井钻井技术

常规的水平井钻井技术我国已完全掌握并成功实践,而页岩地层由于具有层理性与易水化的特点,钻水平井又存在其特殊性。美国 Eagle Ford 项目在造斜方式上主要采取短半径大曲率水平井方式,在表层段定向造斜 5° 后钻斜直井,钻至目的层前采用 ($8^\circ \sim 12^\circ$)/30 m 的大曲率造斜着陆,造斜段长度在 240 ~ 360 m 左右,既减少了钻井进尺,又降低了资源浪费,页岩气的大曲率造斜与常规曲率造斜对比见图 4。

4.2 钻井液完井液技术

Eagle Ford 区块钻井过程中在表层段选用水基钻井液以节约成本,水平段使用油基钻井液抑制页岩水化。我国四川盆地威远构造所钻威 201 - H1 井的实际情况反映:层理性页岩垮塌严重,水敏性页岩水化后易垮塌,返出的铝土质泥岩严重垮塌掉块与层状页岩掉块如图 5 所示。根据我国页岩气地质特点,采用岩石力学与泥浆化学耦合的手段维持井壁稳定是实现页岩气优快钻井的关键。

4.3 页岩气水平井分段压裂技术

该技术主要涉及两个方面:分段压裂工艺和压

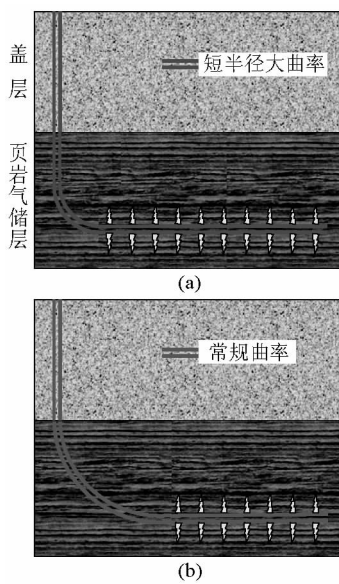


图4 美国 Eagle Ford 页岩气区短半径大曲率造斜方式与常规曲率造斜对比

Fig. 4 Comparison between large curve (short radius) of America Eagle Ford with conventional curve

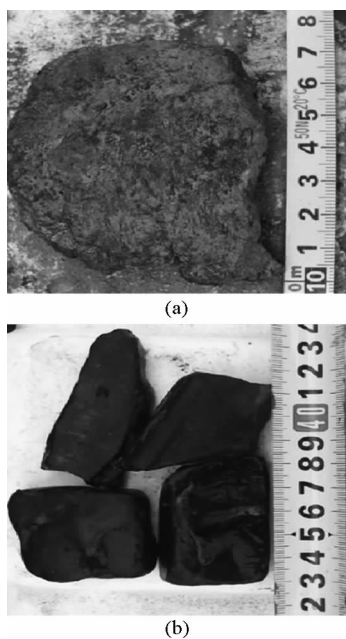


图5 四川盆地威 201-H1 井泥页岩坍塌掉块
Fig. 5 Collapse of shale in well 201-H1 in Sichuan Basin

裂液配方。美国所用的压裂液大多为滑溜水 (slip-water)^[5], 依据 Eagle Ford 页岩储层特性, 该项目中使用的压裂液主要成分为酸液、滑溜水、胶液和胶联携砂液, 每口井的用砂量都在上千吨, 用水量在上万

立方米。分段压裂工艺则主要是指套管射孔后, 通过快速可钻式桥塞封隔各段来实现分段压裂, 整个压裂过程从水平段的趾端向根端逐级作业, 一般压裂级数为 20~30 级, 每级又分 5~8 段, 每段射 6~10 个孔, 称为一簇。通常压裂级间距为 80~100 英尺 (1 英尺 = 0.304 8 m), 便于下可钻桥塞, 簇间距为 30~80 英尺, 以控制每一簇的距离。图 6 为 Eagle Ford 快速可钻式桥塞示意图, 图 7 为 Eagle Ford 压裂分级与簇示意图。成本方面, 每一级的压裂成本约 25 万美元, 一口井单纯压裂成本就达到数百万美元。



图6 Eagle Ford 快速可钻式桥塞示意图
Fig. 6 Eagle Ford fast drillable bridge plug sketch map

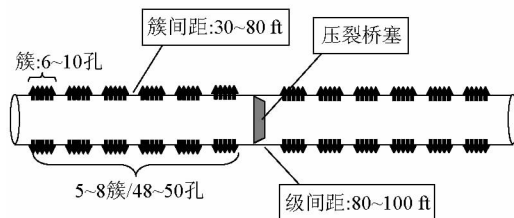


图7 Eagle Ford 压裂分级与簇示意图
Fig. 7 Eagle Ford fracture stages and cluster diagram

页岩中的脆性矿物 (石英及方解石等) 含量决定了页岩气储层被改造的难易程度, 脆性矿物含量越高越易被改造。Eagle Ford 页岩部分符合表 2 所列的指标, 这一特点使得 Eagle Ford 页岩改造过程较为顺利。除分段压裂外, 还有同步压裂、重复压裂、纤维压裂转向技术、微地震裂缝监测等技术^[6], 都值得科研工程人员深入探究。这是根据美国 Eagle Ford 页岩气的特定地质条件设计的, 我国应根据自身地质特点来确定具体的压裂方案。

5 中国页岩气发展的思考

中国拥有不可多得的页岩气可采储量, 令许多国家羡慕不已, 但是能开采出来的才是资源, 储量永远是与技术成正比的。目前, 我国页岩气事业尚处于探索阶段, 真正产业化仍有多重制约因素亟需突破。通过对美国 Eagle Ford 页岩项目的考察, 结合对美国政策的认真解读, 笔者认为我国页岩气发展

应注意以下几个方面:

1)页岩气“热”需要“冷”思考。目前页岩气在我国异常火热,各类投资主体都对页岩气抱有极大热情,但是要清醒地认识到我国的页岩气资源跟美国相比还有很大的不同,情况更加复杂,任务更加艰巨。美国的页岩气资源埋深较浅,一般在1 500~2 500 m,而我国的页岩气埋深更深,一般在3 500 m以上;美国页岩气多分布在水资源较丰富的平原地区,我国页岩气比较富集的区域一般分布在水资源比较缺乏的丘陵山区,人口密集且地表条件不利于施工。加之我国页岩气技术刚刚起步,配套的管理制度也不健全,单凭热情一拥而上,遇到瓶颈又浅尝辄止,势必造成我国各种资源的浪费。所以,我国未来5~10年的首要任务是:资源储量上开展大调查、大评价,技术装备上开展大研发、大储备,方法上开展大协作、大部署,为建立有中国特色的页岩气大开发做准备。

2)走出去请进来,突破技术瓶颈。目前我国页岩气井的建井费用大约在4 000万~5 000万人民币,有的甚至高达7 000万人民币,而著名的美国Barnett页岩气,单口水平井成本大约在1 700万~2 300万人民币。页岩气是讲求低成本见效的产业,具有低产量、产量稳、寿命长的特点。只有突破关键技术瓶颈,以“井工厂”的模式批量作业,规模化开采,才能压缩成本实现盈利。这些关键技术包括水平钻井、分段压裂、极低渗气藏渗流规律等,要结合我国的地质特点,或走出国门或吸引外企,通过交流,消化吸收,锻造出一套有中国特色的、工业化、商业化的技术体系和装备体系。

3)压裂技术移植用于三低油气田。页岩气开发的关键技术——分段压裂技术属于典型的体积压裂,应用于储层能够建立纵横交错的立体裂缝,达到沟通储层与井眼的目的,对于释放产能降低渗流阻力意义重大。我国的三低油气田、稠油油藏与页岩气储层一样都具有难动用的特点,将体积压裂技术的原理用于此类油气田必将大大解放储层,产生丰厚经济效益。尤其是在当前阶段,页岩气储层评价技术尚不完善,先将分段压裂技术试用于三低油气藏特别是海上油气藏,既有利于海上油气田的开发,又能为我国页岩气开发提供技术储备。

4)多种非常规气藏合采同开。总有机碳丰度高的储层常常同时发育多种非常规天然气藏,如页岩气、煤层气、致密砂岩气等,如果教条地将不同的

气藏区分对待,建立多套班子,不同的矿主,不同的管理者,以多套程序开采必定增加数倍的成本,使页岩气开发效益差。如果灵活处理,将同一区块的不同天然气藏一视同仁,不再人为的区分煤层气与页岩气,统筹规划,合采同开,必定能产生事半功倍的效果。

5)资源开发坚守环保阵地。美国目前对返排压裂液的处理通常采用就地挖污水池,靠天然晾干后推平掩埋的办法进行简单处理。页岩气水力压裂所用化学药剂可能会对地下水产生污染,美国联邦政府以及州政府在大力推进页岩气开发的同时,也采取了一系列环保措施,如《美国联邦环境法》、《清洁水法案》、《资源保护和恢复法》等,这些举措保证了美国页岩气的可持续发展。目前,美国环保部正在针对压裂液成分进行立法,要求压裂作业方披露压裂液的化学成分,以便充分评估对地下水的影响。我国在全力发展技术的同时也应注意环境保护,坚决杜绝为攫取资源而破坏生态的行为,保证页岩气可持续发展。

6)政府大力扶持页岩气开发。美国政府大力支持页岩气发展,美国政府在《能源意外获利法》中规定,对2003年之前生产和销售的页岩气实施税收减免政策;2004年《美国能源法案》还规定:十年内联邦政府每年投资4 500万美元用于包括页岩气在内的非常规天然气研究,并专门设立了非常规油气资源研究基金,对能源行业实施五种税收优惠政策;页岩气开发、天然气管网及销售完全独立运行,页岩气按政府规定的价格优先进天然气管网,管网运行商须无条件接受,政府按投资给管网运行商固定的利润率;这些激励政策促使美国页岩气产量扶摇直上。因此适合本国国情的鼓励政策才是美国页岩气异军突起的根本原因,建议我国相关部门尽快出台页岩气优惠政策,扶持民族能源工业的发展。

6 结语

通过对美国Eagle Ford页岩气项目的考察,笔者探究了中国页岩气今后的发展方向,并提出了一些建设性意见,其中涉及技术的问题属于真命题,目前基本都有了解决方案,笔者坚信凭借我国科研技术人员的智慧必定可以实现。我国页岩气发展的亟待明确之处在于如何结合中国特色,建立一套从设计施工到后勤保障的高效管理体制。由于每个国家的具体国情不同,在发展战略和管理体制上照搬国

外的经验往往是行不通的,只有实现管理体制的自主创新,建立适合自身发展的管理办法,才能保证人尽其才,物尽其用。

总之,页岩气商业化开发需要政府鼓励,管理创新,技术进步,只要形成合力就能产生巨大的推进作用。在页岩气正以强盛姿态席卷全球的国际背景下,国内从政府到民众都持乐观态度,并报以很高的期望,中国的页岩气发展之路前景一片利好,加大研究力度和勘探开发的投入刻不容缓。页岩气工业的崛起必将改善中国的能源布局,从根本上提升我国在世界能源格局中的战略地位。

参考文献

- [1] 方小美,陈明霜. 页岩气开发将改变全球天然气市场格局[J]. 国际石油经济,2011(6): 40-43.
- [2] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报,2007,29(6):1-4.
- [3] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学,2009,11(10):55-60.
- [4] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- [5] George E King. Thirty years of gas shale fracturing: what have we learned? [R]. SPE 133456,2011,9.
- [6] Michael D Burmaman, Stephen Smith, Xia Wenwu. Shale gas well completions and maximizing gas recoveries [J]. China Petroleum Exploration,2009(3):65-86.

The enlightenment on shale gas exploration and development in China getting from Eagle Ford in America

Zhou Shouwei, Jiang Wei, Zhang Chunyang, Fan Baitao

(China National Offshore Oil Corp., Beijing 100010, China)

[Abstract] According to relevant estimation, the recoverable reserve of shale gas in China is up to 20 to 30 trillion m³. Although shale gas reserves evaluation is still in the early stage, it quite sure that China is one of the countries who are rich in shale gas resources. If developed subject to current gas annual production, it can be developed for more than 200 years. At present, many companies home and aboard focus on shale gas and compete it in China, and it is expected that shale gas will be the substitution of conventional energy resource in China. Thus the exploration and development of shale gas will bring great effect not only on China but also on the world. However, due to the tightness of shale gas reservoir and its permeability is as low as 10⁻⁹ Darcy scale, if especial stimulation treatments are not taken, it would be very difficult to achieve the goals of commercial development. For the moment, America is the only country in the world that is successful in commercial development of shale gas and its technology and commercial operating mode has been very mature too. CNOOC has invested more than 1 billion US dollar to buy 33.3 % interest of Eagle Ford, where its reserves reach about 600 billion m³, and where its development prospect is valuable. In order to get a comprehensive acknowledgement on the development technology, the author, as a leader, accompanied by a professional team has had a tour observation to Eagle Ford in America and has got a further understanding on key technologies in horizontal drilling and multi-stages fracturing etc. Meanwhile the author also has analyzed the relevant supporting policy framed by USA government, which will be important and valuable for shale gas exploration and development in China.

[Key words] Eagle Ford; shale gas; exploration and development; enlightenment