

# 国外页岩气钻完井、储层改造技术现状及我国适应性分析

刘洪林 王莉 王红岩 刘德勋  
中国石油勘探开发研究院廊坊分院

**摘要:** 页岩气因其储层物性差,孔隙度和渗透率低,因此开采难度大,需要应用特殊的开发技术。目前美国是世界上页岩气开发最早的国家,其开发技术已非常成熟,在页岩气开发中采用了水平井钻井技术、特殊的完井工艺以及水力压裂等储层改造技术。我国的页岩气开发研究尚处于起步阶段,通过借鉴国外的页岩气开发技术,以我国四川盆地为例分析页岩气开发技术适应条件,并结合国内现有的常规天然气开发技术,提出适合我国的页岩气开发技术设想及未来发展方向。

**关键词:** 页岩气 开发 四川盆地 适应性

## 1 概述

页岩气藏属于非常规天然气藏,与常规天然气藏开发相比,储层物性差,孔隙度和渗透率低,采收率差异大且较低。页岩气藏总孔隙度普遍小于 10%,含气孔隙一般不到总孔隙的 50%;渗透率在 0.0001~0.001md 之间;采收率为 5%~60%,而常规天然气藏采收率通常在 60%以上。但是,页岩气田生产周期长,开采寿命可达 30~50 年,甚至更长。美国联邦地质调查局最新数据显示,美国沃思堡盆地 Barnett 页岩气田开采寿命达 80~100 年。

美国是世界上页岩气勘探和开发研究最早的国家,从 1821 年钻探第一口页岩气井,经历了开发基础期、过渡期,目前已进入快速增长期。2007 年美国页岩气产量  $4.33 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,占其天然气总产量的 7.7%,已形成成熟的配套开发技术,正在向降低开发成本、提高采收率方面进行更加深入的研究。加拿大正在勘探几个大型页岩区,如 Alberta、Muskwa 等,发现了一些较好的页岩气藏,目前属于试验性开采,预计在 2010 年将进入大规模开采阶段。我国的四川盆地曾发现页岩气,1966 年在威 5 井、1981 年在阳 63 井的页岩中有天然气产出,而且在付深 1 井、临 7 井、隆 32 井、寺 16 井等页岩层的钻井、气测中出现过气侵、井涌和异常显示等情况,但因为当时对页岩气的认识还不够,并未引起足够重视。随着我国天然气需求量的增加,以及在美国页岩气开发显现的良好势头带动下,我国已开始重视页岩气的开发,但对其研究尚处于起步阶段。

## 2 国外页岩气开发技术

美国将页岩气田开发周期划分为 5 个阶段,即资源评估、勘探启动、早期开采、成熟开采和产量递减阶段。在资源评估阶段需要对页岩及其储层潜力做出评估。在勘探启动阶段开始钻探试验井,测试压裂并预测产量。进入早期开采阶段后,开始快速开发,建立相应标准。在成熟开采阶段进行生产数据对比,确定气藏模型,形成开发数据库。经过一定时间的开采后,进入到产量递减阶段,为了减缓产量递减速度,在此阶段通常需要实施再增产措施,如重复压裂、人工举升等。整体看这 5 个阶段,开发页岩气所采用的技术与常规天然气开发技术有所区别,下面将分别说明。

### 2.1 钻井技术

美国页岩气井钻井主要包括直井和水平井两种方式。直井主要目的用于试验,了解页岩气藏特性,获得钻井、压裂和投产经验,并优化水平井钻井方案。水平井主要用于生产,可以获得更大的储层泄流面积,得到更高的天然气产量。

在水平井钻井中采用了旋转钻井导向工具,可以形成光滑的井眼,更易获得较好的地层评价。同时采用欠平衡钻井技术,实施负压钻井,避免损害储层。随钻测井技术(LWD)和随钻测量技术(MWD),可以使水平井精确定位,同时作出地层评价,引导中靶地质目标。水平井形式包括单支、多分支和羽状水平井。

### 2.2 完井技术

国外从事油气勘探开发的一些公司认为,页岩气井的钻井并不困难,难在完井。主要由于页岩气大部分以吸附态赋存于页岩中,而其储层渗透率低,既要通过完井技术提高其渗透率,又要避免地层损害是施工的关键,直接关系到页岩气的采收率。因此在固井、完井方式、储层改造方面有其特殊技术。

### 2.2.1 生产套管固井技术

页岩气井通常采用泡沫水泥固井技术。由于泡沫水泥具有浆体稳定、密度低、渗透率低、失水小、抗拉强度高特点,因此泡沫水泥有良好的防窜效果,能解决低压易漏长封固段复杂井的固井问题,而且水泥侵入距离短,可以减小储层损害。根据国外经验,泡沫水泥固井比常规水泥固井产气量平均高出 23%。

此外,还采用酸溶性水泥固井技术,通常用于需进行限流水力压裂的水平井段固井。酸溶性水泥在酸基增产液中有很快的溶解速率和很高的溶解度(90%),容易从地层孔隙中清除。如果施工需要,酸溶性水泥也可发泡成为低密度的水泥浆。

### 2.2.2 完井方式

页岩气井的完井方式主要包括组合式桥塞完井、水力喷射射孔完井和机械式组合完井。

组合式桥塞完井是在套管井中,用组合式桥塞分隔各段,分别进行射孔或压裂,这是页岩气水平井最常用的完井方法,但因需要在施工中射孔、坐封桥塞、钻桥塞,也是最耗时的一种方法。

水力喷射射孔完井适用于直井或水平套管井。该工艺利用柏奴利(Bernoulli)原理,从工具喷嘴喷射出的高速流体可射穿套管和岩石,达到射孔的目的。通过拖动管柱可进行多层作业,免去下封隔器或桥塞,缩短完井时间。

机械式组合完井采用特殊的滑套机构和膨胀封隔器,适用于水平裸眼井段限流压裂,一趟管柱即可完成固井和分段压裂施工。目前主要技术有 Halliburton 公司的 Delta Stim 完井技术,施工时将完井工具串下入水平井段,悬挂器坐封后,注入酸溶性水泥固井。井口泵入压裂液,先对水平井段最末端第一段实施压裂,然后通过井口落球系统操控滑套,依次逐段进行压裂。最后放喷洗井,将球回收后即可投产。膨胀封隔器的橡胶在遇到油气时会自动发生膨胀,封隔环空、隔离生产层,膨胀时间也可控制。

## 2.3 储层改造技术

页岩气储层改造技术包括水力压裂和酸化。可以通过常规油管或连续油管进行施工。

水力压裂适用于致密储层。关键在于压裂液处理,除了使用大量的活性水外,还要加入一些特殊的添加剂,如特殊的降阻剂(不含苯酚)、微乳化表面活性剂、裂缝清洁加强剂和导流增强剂等。特殊的降阻剂可以减少压裂表面形成长链聚合物造成对储层的损害;微乳化表面活性剂用于降低页岩中的毛细管压力和压裂液表面张力,改善渗透率,而且因为替代了甲醇,因此安全、环保;裂缝清洁加强剂和导流增强剂可以加速裂缝清洁和压裂液的回流。在这些添加剂的综合作用下,可以改善页岩气层本身超低的渗透率,提高导流性,优化页岩气的生产条件,减小地层损害。

水力压裂施工时,采用大量的活性水和少量的支撑剂。根据国外的实践经验,页岩气采收率与支撑剂尺寸之间不存在对应关系,许多井在无支撑剂或只有少量支撑剂的情况下,也可达到商业采收率。

目前美国又发展了新的技术,就是在两口或两口以上相邻的水平井(水平井段基本平行)同时进行水力压裂。既可以解决地面施工环境的局限性,又可以提高水力压裂裂缝网络的密度,从而提高储层渗透性。

在水力压裂施工中采用微地震监测这一辅助技术,通过倾斜仪和传感器可以远距离在地面或井下对压裂效果进行监测,记录在水力压裂期间由岩石剪切造成的微地震或声波传播情况。通过处理微地震数据确定水力压裂产生的裂缝走向、倾向、高度、长度等。

酸化在页岩气增产措施中是一个相对较新的方法。由于页岩中含有一定量的可与酸反应的矿物,通过酸化可以清除这些矿物,增加新产生的裂缝的表面积,提高页岩气向裂缝网络中的扩散能力。在试验中,当向页岩气生产层中注入 20000~200000 加仑的弱酸后,出现了意想不到的压降,采用此方法改造的页岩储层初始产量是未采用酸化液处理的两倍。酸化在早期的页岩气田改造中采用显现的效果最佳。

国外在新井或老井再次增产或二次完井中经常采用连续油管进行施工作业,可用于单支或多分支水平裸眼井或套管井。目前 Halliburton 公司的 SurgFrac 技术和 CobraMax 技术均可采用连续油管施工。

SurgyFrac 技术是将水力喷射技术与水力压裂技术相结合,通过连续油管将喷射工具下到压裂位置,先进行水力喷射射孔,然后提高环空压力使裂缝扩展,形成 4-6 英寸深的孔穴。该技术适用于裸眼井,可实现分段压裂。

CobraMax 技术是在水力喷射射孔后,从环空泵入支撑砂暂时堵住孔穴,形成“支撑塞”,然后上提管柱进行下一层射孔,再泵入支撑砂暂时堵住孔穴。当完成所有层段射孔后,下放管柱将“支撑塞”挤掉,为气流形成通道。该技术适用于套管井,通过连续油管操作可在水平井段精确控制裂缝分布,并具有井控功能,一趟管柱进行多层作业,免去下封隔器或桥塞,缩短完井时间。

当开采进入到产量递减阶段时,需要采取再次增产措施以提高采收率。美国主要采用的是重复压裂技术和人工举升技术。

重复压裂就是在老井中再次进行水力压裂。直井中的重复压裂可以在原生产层再次射孔,注入的压裂液体积至少比其最初的水力压裂多出 25%,可使采收率增加 30-80%。水平井的重复压裂必须设法隔离初始压裂层位,新的压裂层位必须是水平井眼中未压裂过的区域,Halliburton 公司的 SurgyFrac 技术和 Delta Stim 技术适用于水平井的重复压裂。

人工举升技术主要应用于产层出水的情况,包括气举、泵排等。Schlumberger 公司的 PerfLift 系统用于页岩气井射孔层出水的气举。该系统中有带双孔的生产封隔器,通过双孔分别安装上部 and 下部油管管柱,封隔器坐封于出水射孔层上部的套管中,其上部油管管柱内安装常规或侧囊气举心轴,下部油管管柱内按尺寸大小排列安装内嵌式气举心轴和气举阀。系统工作时,压缩空气从封隔器上部的油套环空注入,进入到下部油管管柱中,举升射孔层产出水液柱,通过上部油管管柱到达地面。该系统结构简单,举升效率高,并且成本较低,还可进行实时监测。

### 3 我国页岩气开发适应技术分析

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,结合我国开发常规天然气积累的经验,优化出适应性较强的页岩气开发技术。

#### 3.1 国内外页岩储层层位对比

美国页岩储层属于海相沉积,层位深度范围在 76~2440m,厚度通常大于 30m。例如 New Albany 和 Antrim 有 9000 口页岩气井深度在 76~610m; Appalachian、Devonian 和 Lewis 有 20000 口页岩气井深度在 915~1525m; Barnett 和 Woodford 页岩气井要更深些,在 1525~2440m,厚度为 30~150m; Caney 和 Fayetteville 页岩气井深度在 610~1830m。

我国四川盆地页岩气比较有利的储层是下志留系龙马溪组和下寒武系九老洞组,这两个层位的深度分别在 2188~4131m 和 1948~4618m,也属于海相沉积。下志留系龙马溪组黑色页岩厚度由威远地区的 0~170m 向东南增厚到 650m,下寒武系九老洞组页岩厚度基本稳定在 200~300m。

通过以上比较我们可以发现,我国四川盆地的页岩气富集储层埋深比美国的大,厚度相当。

#### 3.2 国内外页岩储层特性对比

以美国 Barnett 页岩和四川盆地龙马溪组和九老洞组页岩为例,从页岩储层的镜质组反射率、总有机质含量、孔隙度、渗透率等方面进行对比(见表 1)。

表 1 美国 Barnett 与四川盆地龙马溪组和九老洞组页岩物性对比

指 标	Barnett	龙马溪组	九老洞组
镜质组反射率	2.2%		1.87~2.76%
总有机质含量	>3%		0.85%~3.5%
硅含量	55%	41%	66% (含长石)
粘土矿物含量	<40%	19.1%	17%~32%
孔隙度	4.5%	4.8%	2%
渗透率	$2.5 \times 10^{-4}$ md	$1.96 \times 10^{-3}$ md	$2.25 \times 10^{-13} \sim 1.48 \times 10^{-7}$ md

通过比较,以上几组页岩各指标基本相当,但是对于四川盆地页岩储层的改造还需参考其它因

素, 通过试验进一步验证。

### 3.3 国内页岩气开发技术适应性分析

我国水平井钻井技术与欠平衡钻井技术已比较成熟, 2005 年以来, 西南油气田先后引入 LWD、旋转地质导向、FEMWD 等先进装备, 2007 年应用欠平衡钻井技术完成广安 002—H1 井钻井作业, 水平井段超过 2000m。

在固井方面, 泡沫水泥固井技术从二十世纪 80 年代就已在我国部分油气田进行应用, 目前在青海油田花土沟、吐哈油田巴喀、胜利油田草桥、鄂尔多斯气田、河南油田气井中均取得了较好的应用效果, 技术已相对成熟。

目前国内完井常采用工艺包括射孔完井, 如 TCP 射孔、水力喷射射孔, 以及多功能组合管柱试油完井等, 这些技术在国内各油气田均得到广泛应用。

对于储层的改造技术, 水力压裂、酸化工艺广泛应用于国内油气井增产。其中连续油管水力喷射加砂压裂在大庆、长庆、四川、吐哈等油田得到成功应用, 在此基础上发展的水平井分段水力喷射加砂压裂技术也较成熟。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院在压裂设计与研究方面具有较高的水平, 目前正在针对页岩储层的特性开展相应的储层改造液体体系和优化设计研究。

在压裂设备方面, 我国许多油气田已从国外进口了大型的压裂设备, 如四川井下作业公司先后引进了 FC-2251-Q 型压裂车、HQ2000 型压裂车、FBRC100ARC 混砂车、HR10M 连续油管作业等设备, 可以完全满足水力压裂施工的需要。

再次增产可采用重复压裂技术、人工举升技术。大庆油田成功应用了裂缝转向重复压裂技术, 可以实现裂缝有效控制, 气举排水在煤层气开发中已经被大量采用。

## 4 结论与认识

4.1 页岩储层的钻井包括直井和水平井, 以目前国内技术完全可以实现。

4.2 为了提高固井质量, 在成本允许的条件下可以采用泡沫水泥固井技术。

4.3 目前国内从页岩气井的钻探到储层改造均已具备了一定的技术基础, 但还未投入实践, 需要开展试验性的工作进行验证, 并从中摸索经验。

4.3 在开发初期, 可以先选择较浅(深度 2000m 左右)的页岩储层钻直井进行试验, 了解目的层特性, 获得钻井、压裂和投产经验, 获取一定数据资料和施工经验后再向深井(深度 3000~4000m)和水平井发展。先期水平井压裂试验应在单支水平井中进行, 积累一定成功经验后再试验同步压裂等技术。

4.4 储层改造技术上, 可以借鉴国外的经验。根据四川志留系龙马溪组页岩分析, 其中石英含量较高, 具有较高的脆性, 这对水力压裂非常有力。在产层初期改造时, 可采用水力压裂工艺, 对于水平井可采用较为成熟的分段水力喷射射孔压裂技术, 此外对水力压裂效果监测可尝试微地震监测技术。根据四川志留系龙马溪组页岩样品矿物分析结果, 其中方解石平均含量 16.6%, 白云石平均含量 14.2%, 因此可以考虑通过酸压来提高储层渗透率, 但必须经过实验室分析测试后, 才能决定是否采用该工艺以及采用何种酸液体系。

4.5 建议在水平井水力压裂方面开发或引进类似 Delta Stim 技术的用于水平裸眼井段的增产滑套完井和分段压裂技术。

## 参考文献

- [1] Ron Hyden, Von Parkey, etc. "Custom technology makes shale resources profitable" Oil & Gas Journal, Dec. 24, 2007: 41~49
- [2] Alan Petzet "BC' s Muskwa shale shaping up as Barnett gas equivalent" Oil & Gas Journal, Mar. 24, 2008: 40~41
- [3] Les Bennett, Joël Le Calvez, David R. Sarver, etc. "The source for hydraulic fracture characterization" Oilfield Review Winter 2005/2006: 42~57
- [4] Gary W. Schein, Stephanie Weiss "Simultaneous fracturing takes off" E & P Mar 19, 2008

- [5] 贾芝, 胡富源, 郭卫军, 等 用于封固气层的泡沫水泥浆固井技术 钻井液与完井液 2003 年第 20 卷第 20 期: 22~24
- [6] 陈作, 吴允 四川水平井钻井技术的现状及发展方向 钻采工艺 第 26 卷第 4 期 2003. 7: 1~2
- [7] 杨玻, 肖润德, 潘登, 等 四川欠平衡钻井完井配套技术完善与推广应用 钻采工艺 第 30 卷第 2 期 2007. 3: 22~24
- [8] 唐嘉贵, 吴月先, 赵金洲, 等 四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨 钻采工艺 2008. 5
- [9] 王德新, 彭礼浩, 吕从容 泥页岩裂缝油、气藏的钻井、完井技术 西部探矿工程第 8 卷 第 6 期: 15~17 1996 年 11 月
- [10] 陈光新 水平井中限流压裂完井设计 国外油田工程第 23 卷第 2 期(2007 • 2): 11~13