

# 页岩气钻完井技术现状及难点分析

崔思华<sup>1,2</sup> 班凡生<sup>3</sup> 袁光杰<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京) 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 3. 中国石油集团钻井工程技术研究院

崔思华等. 页岩气钻完井技术现状及难点分析. 天然气工业, 2011, 31(4): 72-75.

**摘要** 页岩气勘探开发在中国刚刚起步, 缺乏相关技术经验。为此, 介绍了国外页岩气钻完井技术现状及最新进展。国外页岩气开发先后经历了直井、单支水平井、多分支水平井、丛式井、丛式水平井钻井(PAD 水平井)的发展历程; 目前水平井已成为页岩气开发的主要钻井方式, 页岩气水平井钻井要考虑其成本, 垂直井段的深度不超过 3 000 m, 水平井段的长度介于 500~2 500 m; PAD 水平井钻井利用一个钻井平台作为钻井点, 先后钻多口水平井, 可以降低成本、节约时间, 是比较新的页岩气钻井技术; 页岩气固井主要采用泡沫水泥固井技术, 完井方式以套管固井后射孔完井为主。在综合分析国外页岩气钻完井技术及钻完井难点的基础上, 指出国内页岩气钻井应着力解决在保持井壁稳定、预防事故、降低钻井成本、研发配套仪器和优选钻井液配方等方面存在的问题。

**关键词** 页岩气 钻井技术 现状及难点 水平井 欠平衡钻井 固井 完井 钻井液配方

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.04.017

页岩气是以多种相态存在、主体上富集于泥页岩(部分粉砂岩)地层中的天然气聚集, 页岩气具有储量大、生产周期长等特点, 全世界页岩气总资源量约为  $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前美国已经在密歇根、印第安纳等多个盆地实现了页岩气的商业开采。

页岩气藏的储层一般呈低孔隙度、低渗透率的物性特征, 气流的阻力比常规天然气大, 采收率比常规天然气低, 一般需要实施储层压裂改造才能开采出来<sup>[1-2]</sup>, 页岩气开发的成本也就相对增加了。因此, 为了获得较高的收益率, 需要加快钻井速度, 提高单井产能, 延长开采期限<sup>[3]</sup>。

## 1 页岩气钻井发展历程

美国在页岩气开发方面走在了世界的前列, 已进入页岩气开发的快速发展阶段, 其页岩气产量已占到美国天然气总产量的相当份额; 加拿大商业开采还处于起步阶段, 1998 年底开始页岩气商业开采, 2008 年的日产量超过  $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; 而欧洲才刚刚起步。

自从美国 1821 年完钻世界上第一口页岩气井以

来<sup>[4]</sup>, 页岩气钻井先后经历了直井、单支水平井、多分支水平井、丛式井、PAD 水平井钻井(丛式水平井)的发展历程。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, 2002 年以前, 直井是美国页岩气开发的主要钻井方式; 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, 随着 2002 年 Devon 能源公司 7 口 Barnett 页岩气实验水平井取得巨大成功<sup>[5-7]</sup>, 水平井已成为页岩气开发的主要钻井方式; PAD 水平井钻井是利用一个钻井平台作为钻井点钻多口水平井, 可以降低成本、节约时间, 是比较新的页岩气钻井技术。

## 2 钻井工艺技术

水平井是页岩气藏成功开发的关键因素, 水平井的推广应用加速了页岩气的开发进程。在页岩气层钻水平井, 可以获得更大的储层泄流面积, 更高的天然气产量。根据美国页岩气开发的经验, 水平井的日均产气量及最终产气量是垂直井的 3~5 倍, 产气速率则提高

**作者简介:** 崔思华, 1971 年生, 高级工程师, 处长; 博士毕业于西南石油大学, 目前为中国石油大学(北京)在站博士后; 先后在中国石油勘探开发研究院廊坊分院天然气地质所、煤层气研究所、科技管理处工作, 主要从事天然气、煤层气及页岩气勘探开发研究工作, 负责的“中国大中型气田形成条件及分布规律”等多项课题获省部级成果奖。地址: (065007) 河北省廊坊市万庄 44 号信箱。电话: (010) 69213280, 18601229878。E-mail: cuisihua69@petrochina.com.cn

10 倍,而水平井的成本则仅为垂直井的 25%~50%。

国外在页岩气水平井钻完井中主要采用的相关技术有<sup>[8]</sup>:①旋转导向技术,用于地层引导和地层评价,确保目标区内钻井;②随钻测井技术(LWD)和随钻测量技术(MWD),用于水平井精确定位、地层评价,引导中靶地质目标;③控压或欠平衡钻井技术,用于防漏、提高钻速和储层保护,采用空气作循环介质在页岩中钻进;④泡沫固井技术,用于解决低压易漏长封固水平段固井质量不佳的难题,套管开窗侧钻水平井技术降低了增产措施的技术难度;⑤有机和无机盐复合防膨技术,确保了井壁的稳定<sup>[9]</sup>。

另外,页岩气水平井钻井要考虑其成本,垂直井段的深度不超过 3 000 m,水平井段的长度介于 500~2 500 m。考虑到钻井完成后,页岩气开发要进行人工压裂,水平井延伸方位要垂直地层最大应力方向,这样才能保证沿着地层最大应力方向进行压裂。

欠平衡钻井时,人们有意识地在裸眼井段使井筒压力低于地层压力,当钻遇渗透性地层时,地层流体会不断流入井筒并循环到地面以利于控制,页岩气用空气作循环介质在暗色页岩中钻进,可依据演化模式预测暗色页岩对扩散相天然气封闭的能力,以指导页岩气藏勘探,提高勘探开发水平。另外,在页岩气水平井钻井中,采用欠平衡钻井技术,实施负压钻井,能够避免损害储层。

美国肯塔基州派克县的派克 31 井是泥盆系页岩气井,1986 年 8 月完钻,完钻井深 1 330 m,在井深 809 m 至完钻井底使用空气钻井,目的是在钻井时排出地层水以保持干净的井筒,便于识别天然裂缝和烃类进入井筒的情况。

### 3 固井技术

页岩气固井水泥浆主要有泡沫水泥、酸溶性水泥、泡沫酸溶性水泥以及火山灰+H 级水泥等 4 种类型。其中火山灰+H 级水泥成本最低,泡沫酸溶性水泥和泡沫水泥成本相当,高于其他两种水泥,是火山灰+H 级水泥成本的 1.45 倍。

1)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、失水量小、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,可以减轻储层损害,泡沫水泥固井比常规水泥固井产气量平均高出 23%。美国 Oklahoma 的 Woodford 页岩储层中就利用了这种泡沫水泥来固井,它确保了层位封隔同时又抵制了高的压裂压力。泡沫

水泥膨胀并填充了井筒上部,这种膨胀也可以有助于避免凝固过程中的井壁坍塌,泡沫水泥的延展性弥补了其低的压缩强度。

2)美国 Bernatt 页岩钻井过程用酸溶性水泥固井,酸溶性水泥提高了碳酸钙的含量,当遇到酸性物质水泥将会溶解,接触时间及溶解度影响其溶解过程。溶解能力是碳酸钙比例及接触时间的函数。常规水泥也是溶于酸的,但达不到酸溶性水泥的这个程度,常规水泥溶解度一般为 25%,而酸溶性水泥溶解度则达到 92%,较容易进行酸化压裂。

3)泡沫酸溶性水泥由泡沫水泥和酸溶性水泥构成,具有泡沫和酸溶性水泥的特点,同时兼备泡沫水泥和酸溶性水泥的优点。一种典型的泡沫酸溶水泥由 H 级普通水泥加上碳酸钙,以提高酸的溶解性,然后用氮气产生泡沫。该类型水泥固井不仅能够避免水泥凝固过程中的井壁坍塌,而且还能够提高压裂能力。

4)火山灰+H 级水泥体系通过调整泥浆密度来改变水泥强度,用来有效防止漏失,同时有利于水力压裂裂缝,流体漏失添加剂和防漏剂的使用能有效防止水泥进入页岩层。这种水泥要能抵制住比常规水泥更高的压力。

## 4 完井技术

页岩气井的完井方式主要包括套管固井后射孔完井、尾管固井后射孔完井、裸眼射孔完井、组合式桥塞完井、机械式组合完井等。

套管固井后射孔完井(图 1)的工艺流程是:在套管固井后,从工具喷嘴喷射出的高速流体射穿套管和岩石,达到射孔的目的,通过拖动管柱进行多层作业。其优点是免去下封隔器或桥塞,缩短完井时间,工艺相对成熟简单,有利于后期多段压裂,缺点是有可能造成水泥浆对储层的伤害。美国大多数页岩气水平井均采用套管射孔完井。

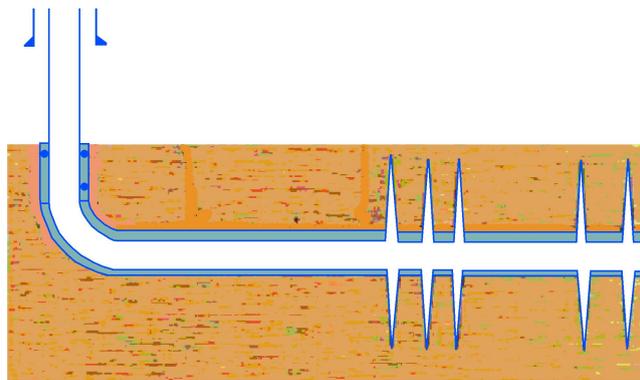


图 1 套管固井后射孔完井示意图

尾管固井后射孔完井的优点是有利于多级射孔分段压裂,成本适中,但工艺相对复杂,固井难度较大,可能造成水泥浆对储层的伤害。裸眼射孔完井能够有效避免水泥浆对储层的伤害,避免注水泥时压裂地层,避免水泥侵入地层的原有孔隙当中,工艺相对简单,成本相对较低,缺点是后期多级射孔分段压裂难度较大,不易控制,后期完井措施难度加大。尾管固井后射孔完井及裸眼射孔完井在页岩气钻井中不常用。

组合式桥塞完井<sup>[10]</sup>是在套管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式,其工艺流程是下套管、固井、射孔、分离井筒,但由于需要在施工中射孔、坐封桥塞、钻桥塞,因此也是最耗时的一种方法(图2)。

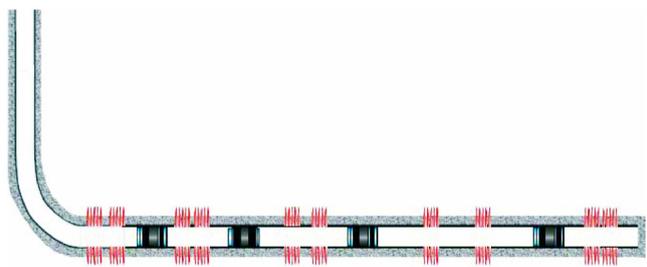


图2 组合式桥塞完井示意图

机械式组合完井是目前国外采用的一种新技术,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。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,目前主要有 Halliburton 公司的 Delta Stim 完井技术。

## 5 钻完井难点及研究重点

### 5.1 难点分析

1)由于页岩地层裂缝发育,长水平段(1 200 m 左右)钻井中易发生井漏、垮塌等问题,造成钻井液大量漏失、卡钻、埋钻具等工程事故。

2)页岩气水平井钻井中,水平段较长,摩阻、携岩及地层污染问题非常突出,钻井液好坏直接影响钻井效率、工程事故的发生率及储层保护效果。

3)页岩气单井产能低,勘探开发成本高,需要优化钻井工艺及研发低成本钻井技术及其配套装备,提高采收率,降低钻井工程成本。

4)固井水泥浆配方和工艺措施处理不当,会对页岩气储层造成污染,增加压裂难度,直接影响后期采气效果。

5)完井方式的选择关系到工程复杂程度、成本及后期压裂作业的效果,适合的完井方式能有效简化工程复杂程度、降低成本,为后期压裂完井创造有条件。

### 5.2 需要重点解决的问题

1)针对页岩具有易膨胀、易破碎的特点,开展页岩气钻井井壁稳定性研究,避免钻井过程中井壁的缩颈或坍塌。

2)针对页岩地层特点,开展预防水平井钻井工程事故的研究,优选或研制有关事故预防和处理工具,避免卡钻、埋钻具等工程事故发生。

3)深入开展适合页岩地层特点的控压或欠平衡钻井工艺技术研究,优化钻井液性能,降低钻具有效摩阻,提高钻井效率,预防井漏发生。

4)根据页岩地层及浆埋深特点,有针对性的研究优化井身结构和完井方式,满足高效、安全、保质及低成本要求。

5)根据地质和井深条件,研究合理优化的井下配套仪器(一般技术指标:工作温度低于 150 °C,工作压力小于 140 MPa,工作时间 120 h),以满足适合页岩特点的水平井钻井需要。

6)开展页岩气水平井固井工艺和水泥浆配方研究(如泡沫水泥浆配方等),确保水平段优质固井质量要求,避免对储层的污染。

### 参 考 文 献

- [1] GALE J F W, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the Barnett Shale and their important for hydraulic fracture treatment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [2] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [3] 张林晔,李政,朱日房.页岩气的形成及开发[J].天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.
- [4] 蒲伯伶,包书景,王毅,等.页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J].石油地质与工程, 2008, 23(3): 33-36.
- [5] ZHAO H, GIVENS N B, CURTIS B. Thermal maturity of the Barnett Shale determined from well-log analysis [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 535-549.
- [6] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconven-

tional shale-gas systems; the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.

- [7] HILL R J, ZHANG ETUAN, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [8] JANWADKAR S, MORRIS S, THOMAS M, et al. Barnett Shale drilling and geological complexities — advanced technologies provide the solution [C]// paper 112765-MS presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March 2008, Orlando, Florida, USA. New York: IADC/SPE Drilling Conference, 2008.
- [9] PENG Chunyao, FENG Weiqiang, YAN Xiaolin, et al. Offshore benign water-based drilling fluid can prevent hard

Brittle Shale hydration and maintain borehole stability [C]// paper 114649-MS presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 25-27 August 2008, Jakarta, Indonesia. New York: IADC/SPE Drilling Conference, 2008.

- [10] LOHOEFER D, ATHANS J, SEALE R. New Barnett Shale horizontal completion lowers cost and improves efficiency [C]// paper 103046-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 24-27 September 2006, San Antonio, Texas, USA. New York: SPE, 2006.

(收稿日期 2011-02-22 编辑 居维清)