

# 美国 Barnett 页岩气开发中应用的 钻井工程技术分析与启示

唐代绪<sup>1</sup>, 赵金海<sup>2</sup>, 王华<sup>1</sup>, 杨培叠<sup>1</sup>

(1. 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083;

2. 中国石化集团石油工程技术研究院信息与标准化所, 北京 100101)

**摘 要** 美国 Barnett 页岩气开发十分成功, 有较多经验可供参考。井身结构设计要满足多次压裂的增产方式和长达 30~50a 生产周期的要求; 丛式井成为降低开发成本、增大对储层控制能力的有效技术; 水平井技术是页岩气开发的关键技术, 水平井的成本一般是垂直井的 1~1.5 倍, 而产量是垂直井的 3 倍左右; 水平段钻进中, 常使用油基钻井液和 PDC 钻头, 在保持水平井眼稳定性的同时, 提高机械钻速; 低密度、高强度固井完井技术, 能为后期储层改造和开发做好准备; 随钻伽马测井曲线, 可用于较准确地识别页岩储层, 若水平井技术结合 geo VISION 随钻成像服务和 RAB 钻头附近地层电阻率仪器等 LWD 技术, 可以更为合理的控制井眼轨迹。提出国内钻井工程技术集成与发展的建议; 实现地面上集成、集中的“小间距丛式井组”(井工厂), 做到“组少井多”; 实现储层中水平井眼轨道空间分布, 合理开发“地下立体井网”, 做到“少井高产和高采收率”; 追求“钻井速度快、井眼质量好、钻井成本低”的钻井模式; 开展长水平段水平井或水平分支井技术的整体研究; 研究满足后期开发和压裂需求的完井方式, 在成本允许的条件下采用泡沫水泥固井技术, 研制特殊套管、封隔器、分支工具等材料和新型井下工具。

**关键词** Barnett 页岩气 水平井技术 丛式井技术 工程技术集成

## 1 前言

所谓页岩气, 其实质是主体上以吸附或游离状态存在于泥岩、高碳泥岩、页岩及粉砂质岩类夹层中的天然气。近年来, 由于天然气供需关系、市场价格以及开采技术进步等因素的影响, 页岩气开发在美国取得极大成功, 使得页岩气的开采成为全球资源开发的一个热点。

中国拥有较丰富的页岩气资源, 为解决天然气供应短缺问题, 开发和利用页岩气正蓄势待发。国土资源部组织专家论证, 认为我国到 2020 年页岩气年生产能力可以提高到  $(150\sim 300)\times 10^8\text{m}^3$ , 以此作为应对天然气供应短缺的举措之一。我国政府希望到 2020 年, 天然气在我国能源供应结构中的比例能从 2005 年的 3% 提高到 10%, 以降低污染。因此, 我国力争到 2020 年能够发现 20~30 个大型页岩气开采目标区块, 获得  $1\times 10^{12}\text{m}^3$  的页岩气可采储量。要实现这样的目标, 应加快技术研发、与国外的合作以及引进技术的步伐。

针对页岩气储层特点, 需要匹配成套工程技

术, 才能解决好页岩气勘探开发的问题。而石油天然气勘探开发过程中形成的现有工程技术, 需要有针对性地集成和发展, 才能完全满足页岩气勘探开发的需求。本文综合介绍美国 Barnett 页岩气开发中应用的钻井工程技术, 并提出国内开发页岩气需要集成和发展的钻井工程技术, 以期推动国内页岩气开发技术的快速发展。

## 2 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气开发状况

### 2.1 页岩气的开采特点

页岩气产自渗透率极低的沉积岩中, 大部分产气页岩分布范围广、厚度大, 且普遍含气, 使得页岩气井能够长期地稳定产气。一般情况下, 页岩气开采具有 3 个特点:

① 生产能力低或无自然生产能力。由于页岩

---

作者简介: 唐代绪, 高级工程师, 1996 年毕业于西南石油大学油气钻井工程专业, 获硕士学位, 目前主要从事钻井工程技术和管理工作。 E-mail: dxtang@sipc.cn

气储集层通常呈低孔、低渗特征,气流阻力比常规天然气大,难以开采,因此所有的井都需要实施压裂改造才能开采出来。

② 井的寿命和生产周期长。页岩气在泥页岩地层中主要以游离态和吸附态存在,游离气渗流速度快,初期产量较高,但产量下降快;相反,吸附气解析、扩散速度慢,产量相对较低,主要产于页岩气稳产期,进入该期后产量递减速度慢,使得生产周期变长。已经有页岩气井生产证明,其寿命最高可以达到 30a 以上。

③ 采收率变化较大,并且低于常规天然气采收率。根据埋藏深度、地层压力、有机质含量和吸附气量等的不同,不同页岩气藏的采收率也不尽相同。相关数据表明,页岩气采收率通常低于常规天然气采收率,常规天然气采收率可达 60% 以上,页岩气采收率一般小于 60%。

不同于常规天然气的开采特点,决定了页岩气开发具有其独特的方式。目前,美国已经拥有一批先进技术可以提高页岩气井的产量,主要包括水平井技术和多层压裂技术、清水压裂技术、重复压裂技术、同步压裂技术等,这些技术正在不断提高着页岩气井的产量<sup>[1]</sup>。近年来,页岩气开采技术的突破使美国的天然气储量增加了 40%,一举成为世界天然气生产第一大国。专家认为,在未来 20 年里,许多国家的天然气储量也将出现类似的增幅<sup>[2]</sup>。

页岩气在勘探开发中的各个环节,无不与科技进步紧密相连,技术的创新与推广,是页岩气开发取得成功的引擎。技术进步推动了并将继续推动页岩气的持续快速发展。

## 2.2 Barnett 页岩气生产史

美国 Barnett 页岩气田在 1999 年产量大幅度增长,为什么天然气的产量在开采了 17a 之后突然大幅上升?原因有两个:其一是实际的天然气地质储量是以前估计的 4 倍,其二是低成本的水力压裂技术得到了成功应用(压裂液为水、降阻剂、杀菌剂、防垢剂和低含量支撑剂)。

在 20 世纪 80 年代以前, Fort worth 盆地的 Barnett 页岩并不是勘探目的层。但是 Barnett 页岩中丰富的天然气显示和意外的小规模产量引起了 Mitchell 公司的兴趣,尤其是雪佛龙公司在煤层甲烷气评价技术的基础上,对该区进行罐解吸和吸附

等温线的研究工作,重新评估了该区的天然气地质储量,坚定了 Mitchell 能源公司在页岩层中寻找非常规天然气的信心。开始的气井产量大多数不具有经济价值,在 1981~1990 年期间仅完钻了 100 口井,该公司将主要的精力集中在如何更有效地在 Barnett 页岩中完井,以及如何提高采收率。到 1998 年,在完井技术上取得了重大突破,用水基压裂液代替了凝胶压裂,对该气田较老的 Barnett 页岩气井(特别是 1990 年底以前完成的气井)重新实施了增产措施,极大地提高了产量,增幅有时可达 2 倍或更高。在很多情况下,对老井重新采取重复压裂可使产量超过初始产量,增产措施在某些不具经济价值的井也获得了成功。目前,所有的 Barnett 气井在生产几年后都要进行例行的重新处理,多次重新完井的情况也很普遍。

从 2002 年开始, Devon 能源公司开始钻探试验水平井。这些井都获得了极大成功,促使人们改变了钻井方式。水平井技术的广泛应用,使 Barnett 页岩气产量出现了稳步快速增长的大好局面。同时,他们开始实验一种新的钻完井模式,即间隔 152~305m 钻 2 口水平井,同时进行压裂来提高单井产量,最终提高采收率。

Barnett 页岩气生产历史给出的启示是:页岩气作为一种非常规气藏是客观存在的,其能否合理地开发利用,取决于认识的提高和技术的进步:一方面,评价技术的发展使人们更加了解 Barnett 页岩的特征,进而对页岩气储量的评估更加客观;另一方面,钻井和压裂技术的进步,在 Barnett 页岩气的开采过程中起到了关键作用<sup>[3]</sup>。

## 3 Barnett 页岩气开发中应用的钻井工程技术

美国页岩气井钻井包括直井和水平井两种方式。直井的目的主要用于试验,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。

### 3.1 井身结构设计

Woodford 和 Hayneville 两个区块的页岩气钻井都是采用三级井身结构,其井身结构示意图和井身参数分别见图 1 和表 1。其中 Woodford 地区 Barnett 页岩气开发用的是  $\phi 508\text{mm}$  的 J-55 导管,  $\phi 444.5\text{mm}$  钻头一开钻至约 142m, 下入  $\phi 339.7\text{mm}$

的 H-40 表层套管;  $\phi 311.15\text{mm}$  钻头二开钻至约 1676m, 下入  $\phi 244.5\text{mm}$  的 N-80 表层套管; 之后, 用  $\phi 222.25\text{mm}$  钻头钻至 4206.24m, 下入  $\phi 139.7\text{mm}$  的 P-110 套管固井完井。由于后期加砂压裂, 因此对套管及套管头承压能力要求较高, 固井质量要好, 水泥返高到地面。

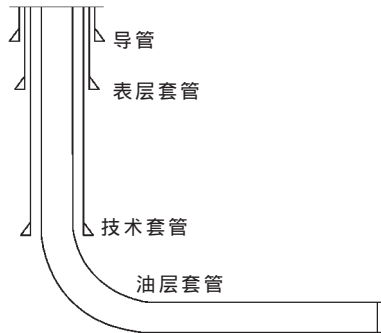


图 1 Woodford 和 Hayneville 典型井身结构示意图

表 1 Woodford 和 Hayneville 井身结构参数

项目	井眼尺寸/mm	套管/mm	完井(型号)	测量井深/m
Woodford	508	406.4	J-55	9.1440
	444.5	339.7	H-40	141.7320
	311.15	219.08	N-80	1676.4
	222.25	139.7	P-110	4206.24
Hayneville	508	406.4	J-55	9.1440
	342.9	273.05	N-80	768.0960
	205.8	193.68	P-110	3108.96
	171.45	127	P-110	5151.12

### 3.2 丛式井钻井技术

页岩气钻井普遍采用丛式井技术, 可采用底部滑动井架钻丛式井组。每井组钻 3~8 口单支水平井, 水平井段间距 300~400m。

用丛式井组开发页岩气的优点如下:

① 利用最小的丛式井井场, 使钻井开发井网覆盖区域最大化, 为后期的批量化的钻井作业、压裂施工奠定基础, 使地面工程及生产管理得到简化(路少、基础设施简单, 天然气自发电, 管理集中)。

② 实现设备利用的最大化。多口井依次一开, 依次固井, 依次二开, 再依次固完井。钻井、固井、测井设备无停待。井深 1500m 左右的致密砂岩气丛式井单井平均钻井周期仅为 2.9d, 垂深 2500m 左右、水平段长 1300m 的页岩气丛式水平井平均钻井周期仅为 27d。

③ 钻井液重复利用, 减少钻井液的交替。多口井一开、二开钻井液体系相同, 重复利用; 尤其是三

开油基钻井液的重复利用特别重要。

④ 压裂施工的工厂化流程, 能够在一个丛式井平台上压裂 22 口井, 极大地提高效率。

### 3.3 水平井技术

与直井相比, 水平井在页岩气开发中具有无可比拟的优势:

① 水平井成本为直井的 1.5~2.5 倍, 但初始开采速度、控制储量和最终评价可采储量却是直井的 3~4 倍。沃斯堡盆地 Barnett 页岩最成功的垂直井在 2006 年上半年页岩气累积产量为  $991.10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 而同期最成功的水平井产量为  $2831.7 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 为直井产量的近 3 倍。

② 水平井与页岩层中裂缝(主要为垂直裂缝)相交的机会大, 可明显改善储层流体的流动状况。统计结果表明, 当水平段为 200m 或更长时, 水平井比直井钻遇裂缝的机会多几十倍。

③ 在直井钻井收效甚微的地区, 采用水平井开采效果良好。如在 Barnett 页岩气外围开采区内, 水平井克服了 Barnett 组页岩上、下石灰岩层的限制, 避免了 Ellenburger 组白云岩层的水侵, 降低了压裂风险, 增产效果明显, 水平井在外围生产区得到了广泛运用。

④ 与直井相比, 水平井减少了地面设施, 开采延伸范围大, 避免了地面不利条件的干扰。

2002 年以前, 垂直钻井是美国页岩气开发中主要的钻井方式, 随着 2002 年 Devon 能源公司在 Barnett 完成的 7 口页岩气试验水平井取得成功, 业界开始大力推广水平钻井, 水平钻井已然成为页岩气开发的主要钻井方式。此后, Barnett 页岩气水平井完钻井数迅速增加, 2003~2007 年, Barnett 页岩气水平井累计达到 4960 口, 占生产井总数的 50% 以上, 2007 年完钻 2219 口水平井, 占该年页岩气完井总数的 94%<sup>[2]</sup>。

水平井技术在页岩气开发应用中有以下几个关键环节:

#### 3.3.1 轨道设计

水平段井眼位置主要依据页岩层的物性, 水平段方位的设计主要依据地应力资料(见图 2)。水平井形式包括单支、多分支和羽状水平井。当前美国页岩气开发中主要应用的是单支水平井。

水平井段与井眼方位应选择在有机质与硅质

富集、裂缝发育程度高的页岩层段,水平井的方位角及进尺对页岩气产量有着重要影响。理论上讲,在与最大水平应力方向垂直的方向上进行钻井,可使井筒穿过尽可能多的裂缝带,从而优化在压裂过程中流出井筒和在生产过程中流入井筒的情况,提高页岩气采收率。

在钻井过程中,井眼穿过裂缝。FMI 全井眼微电阻率扫描成像测井显示出水平井钻遇的裂缝和层理特征(见图 3)。钻井引发的裂缝出现在钻井轨迹顶部与底部,终止于井筒应力最高的侧面。井筒钻穿的自然裂缝垂直穿过井筒顶部、底部和侧面。图中颜色较深的黄铁矿结核非常明显,与层理面平行出现<sup>[2]</sup>。一般水平段越长,最终采收率和初始开

采速度也就越高。据美国公布的数据,最有效的水平井进尺包括造斜井段,一般为 914~1219m。

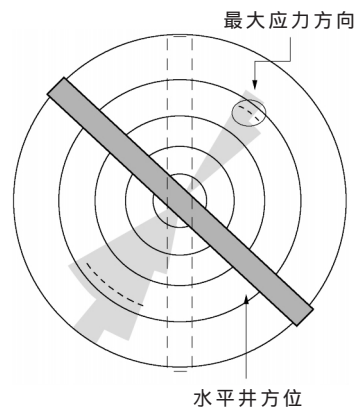


图 2 页岩气水平井设计轨道方位和地应力间的关系

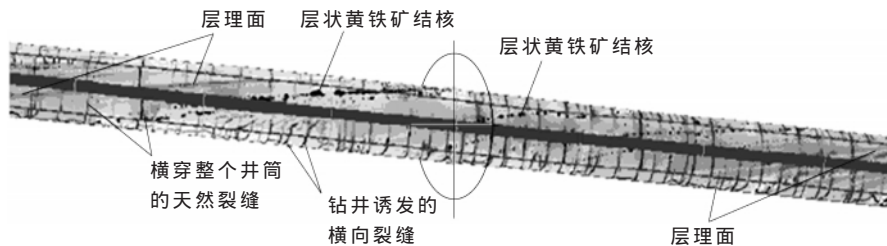


图 3 井筒穿过裂缝的扫描成像测井图

### 3.3.2 随钻测量与地质导向

采用地质导向技术,确保在目标区内钻进,避免断层和其他复杂构造区。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。如今,将MWD 技术应用于水平井钻井,能够实时监控关键钻井参数;将自然伽马测井曲线应用到水平井钻井中,可以进行控制和定位;将钻井随钻测量数据和地震数据进行对比,控制钻头在有机质丰富、自然伽马值高的有利区域钻进。

除此之外,geoVISION 随钻成像服务和 RAB 钻头附近地层电阻率仪器等 LWD 技术,有助于在钻井过程中实时识别天然裂缝,解决相关测井问题。应用该类技术后,可以分析整个井筒长度范围内产生的电阻率成像和井筒地层倾角,而且成像测井可以提供用于优化完井作业的相关信息,包括构造信息、地层信息和力学特性信息等。例如,通过对地层天然裂缝与诱发裂缝进行比较,可以确定射孔和油井增产的最佳目标;在进行加密钻井时,通过井眼成像可识别邻井中的水力压裂裂缝,有助于在新井

中对原先未被压裂部分实施增产措施。井中诱导裂缝的存在及方向,对确定整个水平井的应力变化及力学特性非常有用<sup>[4]</sup>。

### 3.3.3 轨迹控制技术

① 对于位移不大、储层均质性较好、难度一般的水平井钻井,在常规液相钻井液条件下,稳定器钻具组合和弯外壳螺杆钻具与 MWD 组合,可以实现斜井段与水平段的轨迹控制,用随钻伽马一条曲线即可实现地质导向钻井。

② 对于位移较大、难度较高的水平井,使用旋转导向钻井技术钻进,可以钻出更加光滑、更长的水平段。在水平井钻井中,采用旋转钻井导向工具,可以形成光滑的井眼,更易获得较好的地层评价。

③ 水平段钻井一般采用 PDC 钻头,尽量提高钻头寿命,延长单趟钻进尺,有的水平井水平段用一只 PDC 钻头一趟钻完成,快速钻井减少井下复杂情况的出现。

### 3.4 钻井液技术

页岩气钻井过程中,尤其是钻至水平段,由于储层的层理或者裂缝发育、蒙脱石等吸水膨胀性矿

物组分含量高,而且水平段设计方位要沿最小主应力方向,是最不利于井眼稳定的方向,因此,钻井液体系选择要考虑的主要因素有:防止粘土膨胀、提高井眼稳定性、预防钻井液漏失和提高钻速。直井段(三开前)对钻井液体系无特殊要求,主要采用水基泥浆。水平段钻井液主要采用油基泥浆。

### 3.5 固井与完井技术

一般认为,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,而页岩渗透率低,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要求。页岩气井通常采用泡沫水泥固井技术。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,因此具有良好的防窜效果,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%。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。该工艺利用伯努利(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发生膨胀,封隔环空,隔离生产层,膨胀时间可控<sup>[4]</sup>。

### 3.6 欠平衡与气体钻井技术

采用欠平衡钻井技术,实施负压钻井,避免损害储层。欠平衡钻井技术有助于保护储层和提高钻

速,在成本允许的情况下应该提倡应用。至今没有发现用气体钻井的情况,页岩气储层产气量小,若不含水,可以尝试使用空气钻井技术或雾化、泡沫钻井技术,进一步提高机械钻速,并保护储层。

## 4 对我国页岩气开发的启示与建议

页岩气特殊的储层特性、低产量和长生产周期的特点,决定了页岩气开发钻井工程技术集成与发展的两个原则:①低成本。应用丛式井、分支井、快速钻井、简单实用的地质导向水平井等技术,在快和省上做好文章,降低开发成本;②高质量。井眼规则、固井质量好、井筒完整性好、水平段长且位置准确,提高单井产量,为后期多次压裂改造打下基础,并尽量延长生产寿命,满足 30~50a 的生产要求。

参考国外经验和国内的工程技术实际,建议我国着重配套和发展如下几方面工程技术:

### 4.1 页岩气开发井网布局设计

实现地面上集成集中的“小间距丛式井组”(井工厂),做到“组少井多”,减少地面占地和采输设备,降低开发成本;实现储层中水平井眼轨道空间分布,合理开发“地下立体井网”,做到“少井高产和高采收率”。

### 4.2 最优化钻井

与常规石油天然气井相比,页岩气开发单井产量低,要求低成本开发,对工程量最大的钻井来说,要求“钻井速度快、井眼质量好、钻井成本低”,从井身结构设计、钻头优选、钻井液体系选择、轨迹测量与控制、完井方式等各个方面体现出这 3 个要求,形成各个区块页岩气开发的最优化区域钻井模式。

### 4.3 长水平段水平井或水平分支井钻井技术

页岩气储层有效开发需要钻长水平段水平井或水平分支井,要针对性地研究满足开发需求的水平段倾角、井眼直径、纵向位置、水平段长度等,尝试在页岩储层钻水平段后向水平方向、上下方向钻分支井眼,扩大储层井眼密度、提高压裂效果,要研究分支形式、数量和方向等;至于水平段钻井过程的钻井循环流体选择,从调研情况看,美国过去用水基钻井液,后来用油基钻井液,压裂时用过氮气泡沫和水基压裂液,笔者认为这还不是最优选择,油基钻井液和储层页岩之间配伍情况、钻后油的清除情况、水基压裂液与储层的配伍情况等尚需进一步研究。建议对无水储层采用气体钻井、气体压裂,

含水储层采用泡沫钻井液和压裂液技术进行研究。在测量与轨迹控制方式选择上,优化 MWD/LWD 参数组合,选择几道测量参数组合,能够准确测量轨迹和识别储层物性,并辨别储层与相邻地层,选择使用几何导向或地质导向的轨迹控制模式。

#### 4.4 页岩气井完井技术

研究满足后期开发和压裂需求的完井方式设计;套管封固的完井方式优化,在成本允许的条件下可以采用泡沫水泥固井技术;研制特殊套管、封隔器、分支工具等材料和新型井下工具。

#### 参考文献:

- [1] 张卫东,郭敏,杨延辉.页岩气钻采技术综述[J].中外能源,2010,15(6):35-39.
- [2] 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):11-13.
- [3] 张林晔,李政,朱日房.页岩气的形成与开发[J].天然气工业,2009,29(1):124-127.
- [4] 刘洪林,王莉,王红岩,等.中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J].油气井测试,2009,18(4):68-71.

(编辑 谢守国)

## Technology Analysis and Enlightenment of Drilling Engineering Applied in the Development of Barnett Shale Gas in America

*Tang Daixu<sup>1</sup>, Zhao Jinhai<sup>2</sup>, Wang Hua<sup>1</sup>, Yang Peidie<sup>1</sup>*

(1.SINOPEC International Petroleum Exploration and Production Corporation, Beijing 100083;

2.SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101)

**[Abstract]** Barnett shale gas is developed successfully in America providing many experiences. The design of hole structure must need the demands of stimulation by multiple fracturing and long production cycle of 30-50 years. Cluster well has become the effective one for decreasing cost of development and strengthening the control to reservoirs. Horizontal well is the key technique for the development of shale gas, whose cost is 1-1.5 times of the vertical well and whose production is about 3 times of the vertical well. During the drilling of the horizontal section, oil-based drilling fluid and PDC bit are usually used for holding the horizontal hole stability and enhancing rate of penetration. Well cementation and completion at low density and high strength may get ready for later reservoir reconstruction and production. Gamma ray log while drilling can be used for recognition of the shale reservoir correctly. The combination of the horizontal well and LWD technique (such as geo VISION imaging during drilling and the equipment of formation resistivity near RAB drill bit) may control the well track rationally. A suggestion of technique integration and development of China drilling engineering is proposed: on the surface, integrated and centralized "small-interspacing cluster well group" (well plant) makes the structure of less groups and more wells; in the reservoir, reasonable spatial distribution of horizontal hole track with "underground stereo well pattern" make high output and recovery efficiency by few wells; drilling pattern should be "high drilling speed, good quality of borehole, and low drilling cost". Comprehensive research of drilling technology should be made on the horizontal well with long horizontal interval or horizontal multilateral well. Well completion system meets the demands of later development and fracturing should be researched. Cementing technology of foamed cement may be applied under the condition of the cost permitted. Special casing, packer, multilateral tool and new-type of down hole tool should be developed.

**[Keywords]** Barnett shale gas; technique of horizontal well; technique of cluster well; integration of engineering techniques