

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.201503009

## 涪陵地区页岩气山地“井工厂”钻井技术

周贤海<sup>1</sup>, 嵇艳彬<sup>2</sup>

(1. 中国石化江汉油田分公司地质工程设计监督中心, 湖北潜江 433124; 2. 中国石油化工工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:**涪陵页岩气田地处山地, 环境复杂, 钻场面积受限, 钻前与钻井施工组织难度大、成本高。为此, 借鉴国外页岩气工厂化流水作业理念, 针对涪陵山地特点及页岩气地质与开发特征, 开展了涪陵山地“井工厂”井网部署和井眼轨道设计、井间快速移动钻机改造、工厂化钻井作业流程设计、批量化作业方案设计等方面的研究, 形成了适应涪陵山地特点的页岩气“井工厂”钻井技术。在 JY30 和 JY28 平台的应用表明, 涪陵地区页岩山地“井工厂”钻井技术具有提高钻机作业效率、缩短建井周期、提高资源综合利用率和降低废液排放量等技术优势, 并保障了涪陵页岩气井 4 井式平台当年完成建平台、开钻、完钻、压裂试气和投产目标的实现, 对国内类似页岩气区块的开发具有借鉴意义。

**关键词:**页岩气 井工厂 钻井 山地 涪陵地区

**中图分类号:**TE249   **文献标志码:**A   **文章编号:**1001-0890(2015)03-0045-05

## Application of “Well Factory” Drilling Technology in the Fuling Shale Gas Field

Zhou Xianhai<sup>1</sup>, Zang Yanbin<sup>2</sup>

(1. Geological Engineering Design & Supervision Center, Jianghan Oilfield Company, Sinopec, Qianjiang, Hubei, 433124, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** Sinopec's Fuling shale gas field is located in a complex mountainous environment and the pre-drilling and drilling operations are difficult and costly due to well site logistical limitations. Based on the concepts of the “well factory” process used in shale gas development abroad, and considering the terrain and the geologic and development characteristics of shale gas reservoirs in the Fuling Area, investigations into the deployment of “well factory” well patterns, well trajectory design, modification of fast-moving rigs, design of the well factory drilling process, and the design of batch operation schemewere carried out. Byresearching “well factory” technology suitable for shale gas drilling in Fuling Area was formed. Its application in Pad JY30 and JY28 showed that this technology could help increase rig operation efficiency, shorten the well construction cycle, improve the comprehensive utilization rate of resources, and reduce fluid waste discharge in Fuling Area. In addition, platform construction, drilling, completion, fracturing, well testing and production initiation were completed in the same calendar year for a typical four-well pad in the Fuling Area. All these results can provide reference for the development of other similar shale gas fields in China.

**Key words:** shale gas; well factory; drilling; mountainous terrain; Fuling Area

涪陵页岩气田位于川东南山地-丘陵地区, 地表为典型的喀斯特地貌, 钻前施工、井场建设和钻井材料运输等都面临极大挑战, 钻井工程建设周期长、成本高。根据北美地区页岩气开发经验和国内相关学者的研究结果, “井工厂”钻井技术具有减少征地面积、提高钻机使用效率、降低作业成本和提高材料综合利用等诸多优势<sup>[1-6]</sup>, 已在国内非常规油气藏开发中取得了较好的应用效果<sup>[7-10]</sup>。因此, 为提高涪陵页岩气田钻井效率, 降低钻井工程费用, 围绕涪陵地区山地的地表特点及页岩气开发钻井工程技术要求, 对山地“井工厂”钻井平台布井方案优化、“井工

厂”水平井轨道优化设计、“井工厂”钻机设备的改造与配套以及“井工厂”钻井作业流程设计进行研究, 形成了适用于涪陵山地特点的“井工厂”高效钻井技术, 并在 JY30 和 JY28 平台进行了应用, 取得了较好的效果。

收稿日期:2015-02-01; 改回日期:2015-04-20。

作者简介:周贤海(1962—), 男, 湖北公安人, 1982 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 高级工程师, 主要从事油气钻井工程技术工作。

联系方式:(0728)6581366, zhouxianhai\_jhyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“页岩气‘井工厂’技术研究”(编号:P13138)资助。

## 1 钻井平台布井方案优化

涪陵地区页岩气田一期产建区动用面积  $229.4 \text{ km}^2$ , 动用储量  $1.697.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据成像测井成果, 该地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组下部最大水平主应力方向近东西向, 水平段设计方位与最大水平主应力方向垂直, 为南北向。气藏工程研究表明, 合理的水平段长度为 1 500 m, 水平井间距为 600 m, 水平段端点间距为 100 m。根据气藏工程研究成果, 涪陵页岩气田一期产建区部署 253 口水平井, 水平段平均埋深 2 700 m, 单井平均井深 4 600 m, 开发井网如图 1 所示。

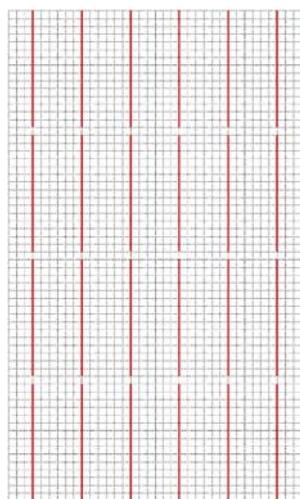


图 1  $3.6 \text{ km} \times 6.3 \text{ km}$  开发井网

Fig. 1 Development well Pattern of  $3.6 \text{ km} \times 6.3 \text{ km}$

### 1.1 布井方案设计

“井工厂”井场布置需要考虑工程和环境的影响, 在满足工程施工的同时, 占地面积应尽量小。需要考虑的具体因素有: 1) 满足产建开发方案和页岩气集输建设要求; 2) 充分利用自然环境和地形条件, 尽量降低钻前工程难度; 3) 考虑钻井能力和井眼轨迹控制能力; 4) 最大程度地动用页岩气储量资源; 5) 考虑地形地貌、生态环境以及水文地质条件, 满足安全环保规定<sup>[11]</sup>。

为满足开发井网的要求, 根据目前水平井钻井工艺技术水平, 并结合山地条件下的钻井平台建造特点, 提出了常规“米”字形布井与平台交叉布井 2 种模式, 形成了 3 套平台布井方案(见图 2)。方案 1, “米”字形井网布井, 垂直靶前距离 400 m; 方案 2, 相邻平台交叉布井, 垂直靶前距离 400 m; 方案 3, 2 套“米”字形井网叠合, 形成交错井网布井, 垂直靶前距离 850 m。

方案 1 为 1 平台 6 口井, 南北方向各 3 口井, 工程难度适中, 平均单井占用井场面积小, 但靶前距的存在造成较大一部分面积的储量没有动用。

方案 2 为 1 平台 3 口井, 与相邻平台向南(或向北)方向 3 口井交叉, 工程难度适中, 靶前距不会造成储量损失, 能够充分动用资源, 但平台利用率低, 平均单井占用井场面积较大。

方案 3 为 1 平台 6 口井, 南北方向各 3 口井, 相邻平台交叉钻探, 靶前距较大, 工程难度较大, 平均

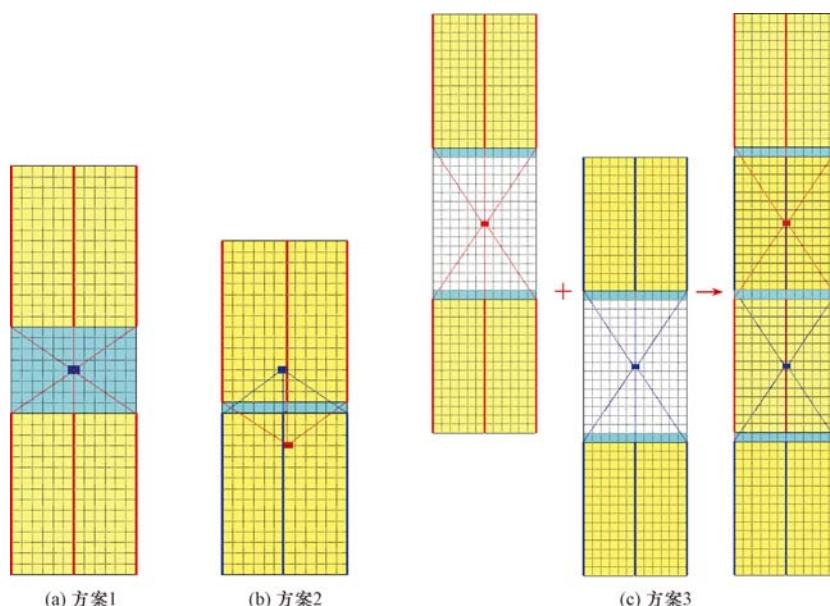


图 2 布井方案设计结果

Fig. 2 Design of well deployment scheme

单井占用井场面积小,靶前距不会造成储量损失,能够充分动用资源。

经综合分析对比,最终采用方案3,该方案既能充分动用资源,又能充分利用平台。考虑涪陵地区的地层特征及表层套管下深要求,对于气藏埋深2 500 m以浅的平台可以考虑部署4口井。

## 1.2 “井工厂”平台布局

2013年,涪陵地区平均完井周期为94 d,钻井平台修建工期至少需要30 d。这样,一个4井平台在常规丛式水平井条件下很难达到当年建平台、当年建产能的目标。采用“井工厂”钻井模式,如果平均单井钻机占用平台时间能控制在70 d之内,则一个4井平台就可以达到当年建平台、当年建产能的目标。立足于当年建平台、当年建产能的目标,“井工厂”平台布局为:6井平台采用双钻机双排布局,井场规格与井口布局如图3(a)所示,井间距为10 m,排距为50 m;4井平台采用单钻机,井场规格与井口布局如图3(b)所示,井间距为10 m。

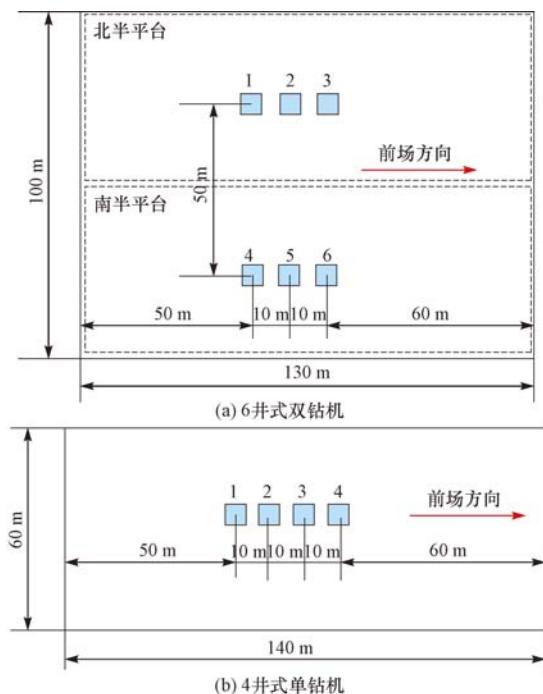


图3 “井工厂”平台布局  
Fig. 3 Layout of a“well factory” pad

地面构筑物包括清水池2个,每个容积1 000 m<sup>3</sup>;放喷池2个,每个容积300 m<sup>3</sup>;清水池、放喷池整个平台共用;井均污水池(含岩屑池)容积为1 000 m<sup>3</sup>。

## 2 水平井轨道优化设计

### 2.1 井眼轨道设计

涪陵页岩气“井工厂”平台井眼轨道具有以下特点<sup>[12]</sup>:1)偏移距大。为保证单井控制储量,各井水平段间距600 m,各水平段处于平行状态,6井平台的平均偏移距为600 m,4井平台的平均偏移距为300 m。2)靶前位移大。为实现地下井网全覆盖,不浪费储量资源,采用交错式井网开发页岩气,单井靶前位移要850 m以上。3)水平段长。水平段平均长度设计为1 500 m。为此,从井眼剖面选择、轨道参数等方面进行了优化设计<sup>[13-14]</sup>。

井眼剖面设计。选择双弧剖面,在两增斜段之间增加稳斜调整段,即采用“直—增—稳—增—水平段”剖面。这样设计的原因:一方面,是为了适应在实钻中目的层深度发生变化时,改变调整方案而不致于使井眼轨迹控制处于被动地位;另一方面,可通过调整段来补偿工具造斜率误差所造成的轨道偏差,使轨迹在最终着陆时进靶更准确、更顺利。

轨道参数设计。造斜点选在二叠系茅口组或栖霞组地层;定向造斜井段的造斜率设计为(15°~18°)/100 m,水平段调整轨迹时设计造斜率为10°/100 m;二维水平井稳斜角控制在40°以内,三维水平井稳斜角控制在35°以内。

### 2.2 防碰设计

由于涪陵地区页岩气开发相邻平台采用交叉布井模式,防碰设计时既要考虑同平台上部井眼防碰,还有考虑相邻平台交叉井大斜度井眼的防碰。

同平台井防碰措施:1)地面井口距离选择井间距10 m,4井平台排间距12 m,6井平台(双钻机)排间距50 m;2)有条件的情况下,井场方向尽可能选择东西向;3)优选造斜点深度,以确保井间距离安全。

相邻平台防碰措施:相邻平台由于交叉钻探,为避免水平段着陆前相碰,设计时在开发井网的基础上,相邻2组井的水平段分别向西、向东统一偏移25 m,这样在着陆前相对应的水平段就有50 m的理论间距,可以有效避免相邻水平段在着陆前相碰。

## 3 钻机设备的改造与配套

为满足“井工厂”钻井作业对钻机快速移动的要

求,对钻机运移方式进行了调研分析,并进行了对比(见表1),优选了适用于涪陵山地条件的钻机快速运移方式。

表 1 钻机运移方式适应性分析

Table 1 Adaptability analysis on moving rigs

| 移动方式 | 移动方向   | 移动速度/(m·min <sup>-1</sup> ) | 地基最低强度/MPa | 井位要求   | 定位精度   | 现有钻机改造 |
|------|--------|-----------------------------|------------|--------|--------|--------|
| 轮轨式  | 横向     | 0.30                        | 0.4        | 单列, 直线 | 单向精确定位 | 不能     |
| 滑轨式  | x/y 方向 | 0.30                        | 0.4        | 多列, 直线 | 单向精确定位 | 可以     |
| 步进式  | 任意方向   | 0.11                        | 0.8        | 任意排列   | 任意精确定位 | 可以     |

从表1可以看出,滑轨式钻机运移装置结构简单,操作和维护方便,配套周期短,只需增加滑轨和液压运移装置,且液压运移装置可以多平台共用,在涪陵地区适用性较好。在此基础上,对该地区“井工厂”钻井设备移运方案进行了优化:1)钻机、井架和钻井平台(包括钻具)整体移动,循环系统、钻井泵、发电房不移动;2)防喷器组作为一个整体随钻机移动并安装;3)采用标准节流管汇及支架,解决钻井液高压管汇和防喷管汇的问题;4)采用转接泵,解决钻井液长距离输送的问题;5)采用电缆转接房,满足井间搬运时电缆的收放;6)采用气动绞车吊移坡道与主梯。

## 4 钻井作业流程设计

根据井眼直径相同(开次相同)和钻井液体系相同或相近的基本原则,结合涪陵地区山地地表环境、地质特征以及页岩气开发需求,优化形成了该地区“井工厂”钻井作业流程(以4井式平台为例)。

### 1) 第1个作业流程:导管与表层作业。

第1口井:a. 立井架,调试钻机设备;b. 开孔钻进;c. 下导管,固井,装防喷器,试压,准备一开钻进;d. 一开钻进;e. 下表层套管,固井;f. 移井架(钻机)至下口井。第2口、第3口井:重复第1口井

的步骤b—f,利用离线作业时间安装上口井的一级套管头。第4口井:完成步骤b—f后安装一级套管头,转入第2个作业流程。

2) 第2个作业流程:\$311.1 mm井眼钻进与技术套管固井作业。

第4口井:a. 组装二开井口防喷器组,连接井控管汇;b. 连接井控装置,试压;c. 下钻探塞,钻塞;d. 二开直井段钻进;e. 定向造斜钻进;f. 通井,电测;g. 下入技术套管,固井;h. 移钻机至下口井。在二开直井段钻进期间,利用离线作业时间配制KCl水基钻井液。第2口、第3口井重复步骤b—h,利用离线作业时间安装上口井的二级套管头。第1口井完成步骤b—g后安装二级套管头,转入第3个作业流程。

3) 第3个作业流程:\$215.9 mm井眼钻进与生产套管固井作业。

第1口井:a. 配制油基钻井液;b. 连接井控装置,试压;c. 下钻探塞,钻塞;d. 三开定向造斜钻进;e. 水平段钻进;f. 通井、电测;g. 下生产套管、固井;h. 移钻机至下口井。第2口、第3口井重复步骤b—h,利用离线作业时间,安装上一口井的油管头。第4口井完成步骤b—g后安装油管头,转入第4个作业流程。

4) 第4个作业流程:完井作业与试气准备。

第4口井:a. 安装井控装置,试压;b. 接小钻具;c. 下钻探塞,扫塞;d. 刮壁;e. 通径,替射孔液;f. 测固井质量,套管试压;g. 移钻机至下口井。第2口、第3口井重复步骤a—g,利用离线作业时间安装上口井的盖板法兰。第1口井完成步骤a—g后,安装盖板法兰,甩钻具,放井架准备搬迁。

## 5 应用效果分析

2014年,涪陵地区12个钻井平台应用了“井工厂”钻井技术,其中有2个平台(JY30、JY28)完成了全部钻井工作。JY30和JY28“井工厂”钻井技术指标及其邻平台JY21情况见表2。

表 2 “井工厂”及其邻平台钻井技术指标对比

Table 2 Comparison of drilling technical index for well factory and adjacent pads

| 平台号  | 作业模式 | 井数 | 井深/m  | 水平段长/m | 钻井周期/d | 完井周期/d | 建井周期/d | 机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> ) |
|------|------|----|-------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|
| JY30 | 井工厂  | 4  | 4 273 | 1 572  | 43     | 51     | 60     | 10.38                     |
| JY28 | 井工厂  | 4  | 4 515 | 1 556  | 50     | 58     | 66     | 9.50                      |
| JY21 | 丛式井  | 4  | 4 325 | 1 500  | 59     | 71     | 87     | 8.58                      |

由表2与涪陵地区其他钻井情况可知,应用山地“井工厂”钻井技术之后取得了较好的效果:

1) 实现了钻井提速,提高了钻机作业效率,加快了页岩气建产进程。与同期的常规丛式井4井平台相比,“井工厂”钻井平台平均机械钻速提高了1.36 m/h(约提高16%),单井钻完井周期缩短了16.5 d(约缩短23%),单井建井周期缩短了24 d(约缩短28%);与2014年涪陵地区平均钻井指标相比,机械钻速提高了2.01 m/h(约提高25%),单井钻完井周期缩短了19.5 d(约缩短26%),单井建井周期缩短了24 d(约缩短28%)。首个“井工厂”钻井平台JY30,于2014年1月7日钻前施工,2月20日第1口井开钻,9月1日平台4口井全部完钻,10月1日完成全部钻井工作(含试气井筒前期准备),10月16日开始试气工作,2014年12月30日投产,实现了当年建平台、当年建产能的目标。JY28平台于2014年2月16日钻前施工,4月10日第1口井开钻,12月16日交平台,2015年2月12日完成全部试气工作,达到投产条件,也实现了当年建平台、当年建产能的目标。

2) 降低了钻井成本,减少了废液的排放量。与同期的常规丛式井4井平台相比,“井工厂”钻井平台平均单井节约16.5 d的钻机录井作业费用;KCl水基钻井液用量由500 m<sup>3</sup>/井降至250 m<sup>3</sup>/井,节约50%;油基钻井液用量由300 m<sup>3</sup>/井降至215 m<sup>3</sup>/井,节约28%;因钻井液体系转换导致的废液排放也减少了1 200 m<sup>3</sup>。

## 6 结论与建议

1) 研究形成的涪陵地区页岩气山地“井工厂”钻井技术在JY30和JY28平台进行了应用,结果表明,该技术能提高钻机作业效率、缩短建井同期,实现钻井提速、增效和减排的目标。

2) 综合考虑涪陵地区山地地表环境、页岩气开发井距要求以及“当年建平台、当年建产能”的生产运行安排等因素,该地区“井工厂”钻井宜采用4井式单钻机和6井式双钻机平台模式。

3) 目前涪陵地区使用的钻机均为大型钻机,结构庞大,机动性差,占地面积大。建议钻机制造厂商加快开发结构型式新颖、模块尺寸小、井场占用面积小和自动化程度较高的新型钻机,以满足页岩气“井工厂”开发作业的要求。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Hummes O, Bond P R, Symons W, et al. Using advanced drilling technology to enable well factory concept in the Marcellus Shale[R]. IADC/SPE 151466, 2012.
- [2] Poedjono B, Zabaldano J P, Shevchenko I, et al. Case studies in the application of pad design drilling in the Marcellus Shale [R]. SPE 139045, 2010.
- [3] Ladlee J, Jacquet J. The implications of multi-well pads in the Marcellus Shale[R]. Ithaca: Community & Regional Development Institute, Cornell University, 2011.
- [4] 张金成,孙连忠,王甲昌,等.“井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用[J].石油钻探技术,2014,42(1):20~25.  
Zhang Jincheng, Sun Lianzhong, Wang Jiachang, et al. Application of multi-well pad in unconventional oil and gas development in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 20~25.
- [5] 刘社明,张明禄,陈志勇,等.苏里格南合作区工厂化钻完井作业实践[J].天然气工业,2013,33(8):64~69.  
Liu Sheming, Zhang Minglu, Chen Zhiyong, et al. Factory-like drilling and completion practices in the joint gas development zone of the South Sulige Project[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 64~69.
- [6] 路保平.中国石化页岩气工程技术进步及展望[J].石油钻探技术,2013,41(5):1~8.  
Lu Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 1~8.
- [7] 陈平,刘阳,马天寿.页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望[J].石油钻探技术,2014,42(3):1~7.  
Chen Ping, Liu Yang, Ma Tianshou. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 1~7.
- [8] 韩烈祥,向兴华,鄢荣,等.丛式井低成本批量钻井技术[J].钻采工艺,2012,35(2):5~8,11.  
Han Liexiang, Xiang Xinghua, Yan Rong, et al. Low-cost batch drilling technology used to drill cluster wells[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(2): 5~8, 11.
- [9] 刘乃震.苏53区块“井工厂”技术[J].石油钻探技术,2014,42(5):21~25.  
Liu Naizhen. Application of factory drilling technology in Block Su 53[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 21~25.
- [10] 王敏生,光新军.页岩气“井工厂”开发关键技术[J].钻采工艺,2013,36(5):1~4.  
Wang Minsheng, Guang Xinjun. Key technologies of shale gas development by “well factory”[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5): 1~4.
- [11] 曾义金.页岩气开发的地质与工程一体化技术[J].石油钻探技术,2014,42(1):1~6.  
Zeng Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1~6.
- [12] 牛新明.涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J].石油钻探技术,2014,42(4):1~6.  
Niu Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 1~6.
- [13] 周贤海.涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J].石油钻探技术,2013,41(5):26~30.  
Zhou Xianhai. Drilling & completion techniques used in shale gas horizontal wells in Jiaoshiba Block of Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 26~30.
- [14] 艾军,张金成,臧艳彬,等.涪陵页岩气田钻井关键技术[J].石油钻探技术,2014,42(5):9~15.  
Ai Jun, Zhang Jincheng, Zang Yanbin, et al. The key drilling technologies in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 9~15.

[编辑 令文学]