

# 四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策

臧艳彬<sup>1</sup>, 白彬珍<sup>1</sup>, 李新芝<sup>2</sup>, 牛新明<sup>1</sup>, 张金成<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中测新图(北京)遥感技术有限责任公司, 北京 100039)

**摘要:**中国石化近几年在四川盆地及周缘页岩气勘探开发取得了重要进展。但该地区页岩气水平井钻井速度低、钻井周期长、成本高、成井质量不高, 严重影响了该地区页岩气商业化勘探开发进程。系统总结了四川盆地及周缘的涪陵大安寨、涪陵龙马溪、彭水和建南等地区页岩气水平井钻井面临的主要问题: 浅部地层出水空气钻井受限、定向段井眼尺寸大机械钻速低、井漏频繁、气体钻井易井斜以及水平段油基钻井液固井质量差。针对上述问题, 从浅层水控制措施、泡沫定向钻井技术试验、井漏的预防与处理、空气钻井防斜打直工具研发、页岩气水平井固井对策以及“井工厂”钻井作业模式攻关与应用等 6 个方面提出了应对技术措施, 为页岩气钻井技术攻关和现场施工提供了借鉴与参考。

**关键词:**页岩气; 水平井; 钻井; 气体钻井; 四川盆地

**中图分类号:** TE243; P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)05-0020-05

**Challenges of Shale Gas Horizontal Well Drilling in Sichuan Basin and Its Vicinity and the Technical Countermeasures/ZANG Yan-bin<sup>1</sup>, BAI Bin-zhen<sup>1</sup>, LI Xin-zhi<sup>2</sup>, NIU Xin-ming<sup>1</sup>, ZHANG Jin-cheng<sup>1</sup>** (1. Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China; 2. China TOPRS Technology Co., Ltd., Beijing 100039, China)

**Abstract:** In recent years, there has been a major breakthrough in shale gas exploration in Sichuan basin and its vicinity by SINOPEC, but the commercialization process of exploration and development is influenced by low penetration rate, long drilling cycle, high drilling cost and bad well completion quality in this area. In this article, the main challenges in shale gas horizontal drilling are summarized, air drilling limited by shallow formation water, low ROP due to large diameter of directed section, frequent circulation lost, hole deviation by air drilling and poor cementing quality in horizontal section with oil based drilling fluid. Aiming at the above challenges, the technical countermeasures are proposed in 6 aspects: shallow formation water control, test of directional drilling with foam drilling fluid, prevention and treatment for circulation lost, development of anti-deviation device for air drilling, cementing of shale gas horizontal well and research and application of multi-well pad drilling technology. All these can provide reference for the research on shale gas drilling technology and construction.

**Key words:** shale gas; horizontal well; drilling; air drilling; Sichuan basin

## 0 引言

页岩油气开采已成为全球油气资源开发的一个热点, 特别是页岩气资源的高效开发, 改变了全球能源供应格局。美国是全球最早开发页岩气资源的国家, 拥有页岩气资源潜力盆地 50 多个, 其中 40 多个已被不同程度地勘探, 目前已实现了规模化商业开发。美国页岩气的年产量由 1998 年的  $104.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 跃升为 2011 年的  $1800 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占当年该国天然气产量的 34%; 美国非常规天然气产量的增加, 使全球天然气期货价格随之下降, 打破了俄罗斯的气价权。产量的大幅增加主要得益于页岩气藏开采

技术的发展, 特别是 2002 年水平井钻井与分段压裂技术的推广应用<sup>[1-4]</sup>。

近几年, 中国石化在四川盆地及周缘的涪陵、彭水、建南等地区进行了页岩气勘探与开发实践, 完成了涪页 HF-1、建页 HF-1、彭页 HF-1、焦页 1HF 等页岩气水平井, 其中彭页 HF-1 井龙马溪组压裂测试后气产量稳定在  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、焦页 1HF 井龙马溪组压裂测试后产量稳定在  $11.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。前期钻探实践展示了四川盆地及周缘良好的页岩气勘探开发潜力, 四川盆地及周缘地区将是未来几年中国石化页岩气勘探开发的重点和热点地区<sup>[5-8]</sup>。

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 中国石化科技部重点攻关项目“页岩气井工厂技术研究”资助

作者简介: 臧艳彬(1984-), 男(汉族), 山东宁津人, 中国石化石油工程技术研究院高级工程师, 钻井工程专业, 博士, 主要从事深井、超深井、页岩气钻井新工艺相关的科研工作, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 916, zangyb.sripe@sinopec.com。

由于该地区页岩油气藏地质条件复杂,部分地区水平井钻井时井漏频繁发生、井壁稳定问题突出、定向段机械钻速慢、钻井周期长、成本高、效率低,严重制约着该地区页岩气藏的商业化开发进度。为此,本文旨在对四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战进行总结分析,并提出相应的技术对策,给页岩气钻井技术与攻关指明方向。

## 1 页岩气水平井钻井概述

自2011年7月中国石化第一口页岩气水平井建页HF-1井完钻以来,截止2013年5月31日,中国石化在四川盆地及周缘的涪陵大安寨、涪陵龙马溪、彭水、建南等4个地区先后完钻了15口页岩气水平井,平均完钻井深3501.87 m,平均水平段长1093 m,平均机械钻速3.99 m/h,平均钻井周期108.71 d,平均建井周期141.98 d,完钻井具体情况见表1。

表1 中国石化四川盆地及周缘页岩气水平井钻井情况

区块	井名	完钻井深/m	水平段长/m	平均机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	钻井周期/d	建井周期/d
涪陵大安寨	涪页 HF-1	3570	1137	3.67	97.48	142.33
	涪页 2-2HF	3320	1000	4.16	107	139.29
	涪页 3-2HF	3490	1030	2.95	147	181.63
	涪页 4-2HF	3550	1000	3.31	118	148.75
	涪页 6-2HF	3450	1037	4.36	76.04	98.04
	涪页 8-1HF	3850	1008	5.95	161.06	183.38
	涪页 9-2HF	3900	1001	4.58	212.58	248.04
涪陵龙马溪	焦页 1HF	2020~3654	1008	1.98	93.38	108.65
	焦页 1-3HF	3800	1000	3.52	86	
彭水地区	彭页 HF-1	3446	1002	6.48	62.38	87.46
	彭页 2HF	3990	1652	4.49	125.88	153.10
	彭页 3HF	4190	1100	4.12	94.29	134.44
	彭页 4HF	3652	1400	5.46	107.88	126.96
建南地区	建页 HF-1	1778	1023	5.93	42.25	107.13
	建页 HF-2	2888	1000	5.93	99.38	128.58
平均		3501.87	1093	3.99	108.71	141.98

### 1.1 涪陵大安寨区块

涪陵大安寨页岩气藏位于四川盆地川东高陡褶皱带内,黄泥堂-云安场和大池干井高陡构造带所夹持的拔山寺复向斜,主要目的层为自流井组大安寨段。截止目前该地区已完钻页岩气水平井7口,平均井深3590 m,平均水平段长1030 m,平均钻井周期131.3 d,平均建井周期163.07 d,平均机械钻速3.98 m/h,其中涪页6-2HF井钻井周期最短,为76.04 d,涪页9-2HF井钻井周期最长,为212.58 d。

### 1.2 涪陵龙马溪区块

涪陵龙马溪组页岩气藏位于包鸾-焦石坝背斜带焦石坝构造,主要目的层为龙马溪组下部的优质页岩层段。截止目前该地区已完钻页岩气水平井2口,平均井深3727 m,平均水平段长1001 m,平均钻井周期89.69 d,平均建井周期108.65 d,平均机械钻速2.55 m/h。该地区2013年共部署页岩气水平井20口(其中,评价井17口,探井3口),正在钻进的钻井12口。

### 1.3 彭水区块

彭水页岩气藏位于上扬子盆地武陵褶皱带彭水德江褶皱带桑拓坪向斜,主要目的层为下志留系龙马溪组页岩地层。截止目前该地区已完钻页岩气水平井4口,平均井深3820 m,平均水平段长1294 m,平均钻井周期97.61 d,平均建井周期125.49 d,平均机械钻速4.92 m/h。除侧钻井彭页HF-1外,彭页3HF井钻井周期最短,为94.29 d,彭页2HF井钻井周期最长,为125.88 d。

### 1.4 建南区块

建南页岩气藏位于上扬子地台川东褶皱带石柱复向斜中部建南构造,主要目的层为侏罗系下统自流井组东岳庙段。截止目前该地区已完钻页岩气水平井2口,平均井深2333 m,平均水平段长1012 m,平均钻井周期70.81 d,平均建井周期117.86 d,平均机械钻速5.93 m/h。

## 2 水平井钻井面临的挑战

目前,中国石化在四川盆地及周缘页岩气水平井钻井过程中面临的主要挑战是浅部地层出水空气钻受限、定向井段机械钻速低、井漏频繁、空气钻易井斜以及水平段油基钻井液固井质量差。

### 2.1 浅部地层出水空气钻受限

涪陵大安寨、涪陵龙马溪和彭水地区页岩气钻井过程中在浅部地层普遍钻遇水层,部分井区地层水量较大,被迫转为泥浆钻进,从而限制了空气/泡沫钻井技术的实施,严重影响了上部大尺寸井眼的机械钻速,增加了钻井周期。中国石化四川盆地及周缘页岩气钻井过程气体出气情况统计见表2。

统计表明,涪陵大安寨、涪陵龙马溪和彭水地区浅部地层气体钻出水情况较为普遍,其中涪陵大安寨工区完钻的7口井中有4口井发生了气体钻出水;涪陵龙马溪工区完钻的焦页1井和焦页1-3HF井均发生了气体钻出水,正钻井焦页9-2HF、焦页5-2HF、焦页12-2HF等多口井也发生了气体钻出水,

表2 气体钻井地层出水情况统计

区块	井名	井深/m	地层	处理措施
涪陵大安寨	涪页4-2HF	92	沙溪庙组	强钻至392 m,被迫转泥浆钻进
	涪页6-2HF	60	遂宁组	累计出水862 m <sup>3</sup> ,被迫转泥浆钻进
	涪页8-1HF	601	遂宁组	出水量0.68 m <sup>3</sup> /h,转泥浆钻进
涪陵	涪页9-2HF	35.67	沙溪庙组	转为泡沫钻井
涪陵龙马溪	焦页1井	238	嘉陵江组	转为雾化钻井
	焦页1-3HF	207	飞仙关	转为雾化钻井,累计出水1656 m <sup>3</sup>
	焦页9-2HF	193	嘉陵江组	转为泡沫钻井
	焦页5-2HF	478	飞仙关	打水泥塞
涪陵	焦页12-2HF	278	嘉陵江	转为清水钻进
彭水区块	彭页3HF	424	大冶组	发生水涌,速度最大32 m <sup>3</sup> /h,压井后转泥浆钻进

特别是焦页5号平台井区地层出水量较大,焦页5-2HF和焦页12-2HF井均因出水量过大被迫转为清水钻进;彭水地区彭页3HF气体钻过程中发生地层出水,彭页2HF和彭页4HF未发生气体钻出水。

## 2.2 定向段机械钻速低

四川盆地及周缘的涪陵大安寨、涪陵龙马溪、彭水以及建南等地区完钻井段平均机械钻速统计对比见图1。统计表明,二开直井段平均机械钻速最高(14.54 m/h);二开定向段平均机械钻速最低(1.74 m/h),一开直井段平均机械钻速为5.39 m/h,主要与部分井地层出水气体钻井受限有关。

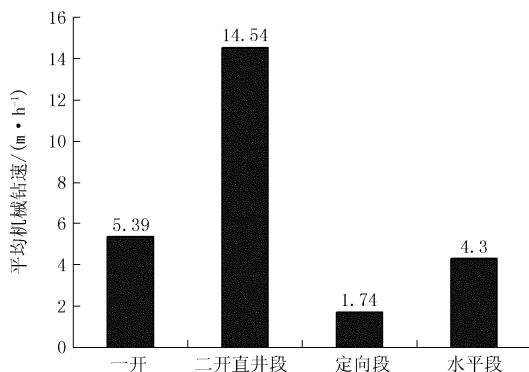


图1 完钻井分段平均机械钻速统计

定向段机械钻速低的主要原因是井眼尺寸大,多为 $\varnothing 311.2\text{mm}$ (12 $\frac{1}{4}$  in),与 $\varnothing 215.9\text{mm}$ (8 $\frac{1}{2}$  in)井眼相比钻头破岩体积大,在螺杆输出扭矩相差不大的情况下,破岩效率低,机械钻速低,同井段不同钻头尺寸的定向钻进机械钻速对比见图2,且目前尚未有一种有效的定向段提速手段,因此,定向段已成为制约四川盆地及周缘页岩气水平井钻井提速的最

主要“瓶颈”。

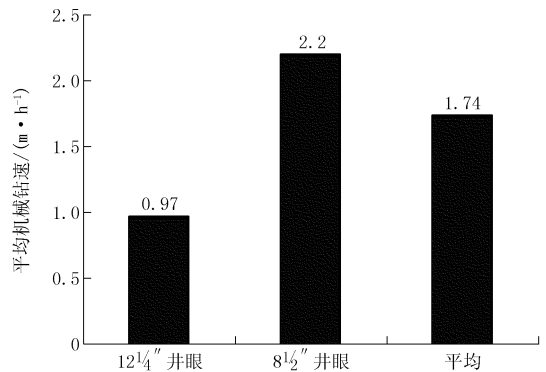


图2 定向段不同井眼尺寸钻速对比

## 2.3 井漏频繁

涪陵大安寨、涪陵龙马溪和彭水区块钻井过程中井漏普遍发生,完钻井井漏情况统计见表3。其中涪陵大安寨地区完钻的7口水平井中5口井发生了井漏,漏失层位主要是上部的沙溪庙组,涪页8-1HF井漏失最多,共计漏失1595.6 m<sup>3</sup>;涪陵龙马溪组钻经小河坝组的井(焦页1HF、焦页1-3HF、焦页9-2HF)均发生了漏失,焦页1HF漏失最多,共计漏失2116.6 m<sup>3</sup>;彭水地区已经完钻的4口水平井均发生了漏失,其中彭页4HF井漏失最多,共计漏失646.4 m<sup>3</sup>。

表3 完钻井井漏情况统计

区块	井名	层位	钻井液密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	井漏次数	漏失总量/m <sup>3</sup>
涪陵大安寨	涪页2-2HF	沙溪庙	1.47~1.54	3	199.70
	涪页4-2HF	沙溪庙	1.67	1	135
	涪页6-2HF	沙溪庙	1.78~1.79	13	216.74
	涪页8-1HF	沙溪庙	1.41~1.48	6	1595.60
	涪页9-2HF	沙溪庙	1.44~1.52	19	1549.30
涪陵龙马溪	焦页1	韩家店	1.53~1.48	2	556.80
	焦页1-3HF	小河坝	1.48~1.42	2	182.60
	焦页9-2	小河坝	1.28	1	150
彭水	彭页HF-1	龙马溪	1.57	18	357.73
	彭页2HF	龙马溪	1.28	16	293.70
	彭页3HF	龙马溪	1.33	4	163.55
	彭页4HF	龙马溪	1.33	14	646.40

注:涪页8-1HF井大安寨喷漏同存2次。

## 2.4 韩家店组空气钻井易井斜

涪陵龙马溪地区和彭水地区采用空气钻钻穿韩家店组地层易发生井斜,如,彭页1井在韩家店组1270 m井斜达到了15.83°、焦页9-2HF井在韩家店组底部1840 m井斜达到了14.7°,焦页7-2HF在韩家店组底部1800 m井斜达到了7.23°。

## 2.5 固井难度大

页岩气水平井油基钻井液固井难度大主要体现在3个方面:(1)水平段长,大多在1000 m以上,套管的下入和居中困难;(2)油基钻井液的有效顶替难度大;(3)射孔和大型压裂对水泥环的抗冲击能力要求高<sup>[10]</sup>。

## 3 技术对策

### 3.1 浅层水的控制措施

(1)综合利用钻井、测井、录井等资料,对工区水层分布规律进行精细描述,建立地层出水量横向和纵向分布规律。根据地层出水描述结果优化井位,尽量避免井位选择在地层出水量比较大的地方。

(2)优化导管和表层套管下入深度:在地势高点井位导管下入深度20~30 m;地势低洼井位导管下入深度约50 m,以有效封固地表水。表层套管封固浅部地层水层,为二开空气钻进提供条件。

(3)根据裸眼井段的地层岩性、井壁稳定性和裸眼井段是否有漏失层等条件,合理确定气体钻井地层出水限定值,当气体钻井中遇到地层出水超过限定值后就要转化为雾化钻井或者泡沫钻井。国外推荐在地层出水超过 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 时就要转,国内采用空气钻井时通常做法是地层出水超过 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 后才转为雾化钻井或泡沫钻井<sup>[11]</sup>。

(4)优化泡沫钻井中所使用泡沫的性能,提高泡沫的携水能力和抑制性,增强泡沫对大出水量的适应性。

### 3.2 探索试验泡沫定向钻井技术

针对页岩气水平井钻井定向段机械钻速低、施工周期长,常规钻井液钻进提速手段有限的技术难题,开展定向段泡沫钻井技术可行性探索。围绕定向段泡沫钻井技术重点开展以下几个方面的工作。

(1)开展定向段泡沫钻井井壁稳定性分析,优先在井壁稳定性较好的工区开展泡沫定向钻井试验。

(2)空气螺杆优选:传统的螺杆钻具使用钻井液作为动力,同时钻井液也用来润滑和散热。但用雾化或泡沫作为循环介质就会有很大的局限性,同时由于泡沫的可压缩性,在注入压力突然增加时马达的腔室不会有明显的变化,不像传统的钻井液会有显著的变化,这种变化可以通过突然的转速降低反映出来。马达结构设计不合理或现场操作不当均会造成马达的速度会超过额定速度,对马达内部造成损坏。

(3)随钻测量系统优选:在泡沫介质条件下,传统的MWD仪器无法工作,要实现随钻井眼轨迹测量就必须采用电磁波随钻测量仪器(EMWD)。泡沫钻井条件下的振动和大排量对EMWD将产生重要影响。

(4)钻进参数优化:综合考虑空气螺杆输入输出特性、井壁稳定、工具面稳定等因素,合理确定钻压、注气量、注液量等参数。

### 3.3 井漏的预防与处理

(1)涪陵大安寨工区:该工区井漏的客观原因是沙溪庙组地层承压能力低,主观原因是井身结构设计不合理,特别是涪页8-1HF和涪页9-2HF井身结构简化后造成沙溪庙低承压层和大安寨高压层同处一个裸眼段,造成反复承压堵漏。因此,该工区的井漏可通过井身结构优化解决,具体做法为:二开技术套管下入深度增加至凉高山组底部,即井斜 $60^\circ\sim 70^\circ$ ,封固沙溪庙组低承压层和凉高山易坍塌地层。

(2)涪陵龙马溪工区:该工区井漏的主要原因在于小河坝组地层裂缝发育。堵漏的难点在于井漏与定向作业同井段,定向钻具中MWD仪器间隙小限制了随钻堵漏剂的加量和堵漏剂颗粒的大小,造成随钻堵漏效果差。EMWD仪器采用电池供电,无需涡轮发电,因此允许通过的固体颗粒较大,对随钻堵漏材料的适用性较常规MWD强。在工区可以采用EMWD+随钻堵漏的方法解决定向井漏的技术难题。

(3)彭水地区:该工区漏失的主要层位是龙马溪组,井漏的主要原因是地层裂缝、层理发育,堵漏的难点是油基钻井液条件下的堵漏成功率低。

### 3.4 加强空气钻防斜打直工具的研发

相关研究表明<sup>[12]</sup>,塔式钻具组合和低压吊打是现场空气钻防斜的主要方法,且取得了良好的使用效果,但却影响了空气钻井的提速效果。空气螺杆在提速和防斜打直方面具有一定效果,但效果不明显,还有待于不断研究和试验。空气锤现场应用证明不但能提高机械钻速,而且在防斜打直方面发挥着巨大作用,但其价格不菲。因此与泥浆钻防斜打直工具相比,适用于空气钻的高效、低成本防斜打直工具相对缺乏,有待于进一步攻关研发。

### 3.5 页岩气水平井固井对策

#### 3.5.1 水泥浆体系优选

针对射孔、多级压裂等作业对水泥环的损伤,从提高水泥环抗冲击能力和水泥石动态力学性能方面

出发,国内外形成了适用于页岩气水平井的水泥浆体系,如,哈里伯顿公司的 ElastiCem® Cement,斯伦贝谢的 Flexstone, BJ 公司的 DuraSe,中石化工程院的 SEP 水泥浆体系,以及 BJ 公司的 Automated Foam Cement 泡沫水泥浆体系。

### 3.5.2 油基冲洗液优选与研发<sup>[10]</sup>

采用多种表面活性剂复合,增加洗油和润湿反转效果,优选或研发油基钻井液冲洗液,用于清洗粘附在界面处的油浆、油膜及滤饼,改善环空界面的胶结环境,同时通过优化前置液结构和用量,有效循环钻井液,提高不规则井眼顶替效率技术,提高固井胶结质量。

### 3.5.3 固井施工工艺<sup>[10]</sup>

通过分析水平井下套管面临的问题,优选、优化套管扶正器的类型和安放位置,确保套管居中度达到 70% 以上;制定页岩气水平井套管下入技术措施,在优化通井程序、采用漂浮接箍和套管抬头技术等方面确保水平段套管顺利下入,从而提高水平井固井质量。

## 3.6 加快“井工厂”钻井作业模式攻关与应用

“井工厂”作业理念的核心是在一个地区部署大批井,以整体化、系统化的部署与设计;标准化、模块化的装备与操作;程序化、流水化的作业与施工;规模化、批量化的生产运行与管理为指导而进行钻井和完井的一种高效低成本的作业模式,从而极大地降低钻井成本、提高压裂效果,实现效益最大化。国外在常规钻完井技术改进升级的基础上,通过关键技术攻关与工艺配套,形成了一套较成熟的“井工厂”钻井作业模式,且已在美国 Marcellus 地区、加拿大 Pembina 地区进行了推广应用。通过“井工厂”技术的应用,Marcellus 地区垂深 2500 m、水平段长 1300 m 的水平井平均单井钻井周期 27 d;Pembina 地区井深 3384 m、水平段长 1217 m 的水平井平均单井钻井周期 7.94 d,较应用前 18.0 d 降低了 56%。截止 2011 年底,Marcellus 页岩气藏超过 83% 的井采用“井工厂”钻井模式。国外“井工厂”技术在非常规特别是页岩气开发中发挥了重要的降本、提速、增效作用。

## 4 结语

(1)定向段机械钻速低、且与井漏同井段,提速

难度大;直井段地层出水气体钻井受限;韩家店组空气钻易发生井斜;水平段油基钻井液固井质量差是四川盆地及周缘页岩气水平井面临的主要挑战,也是该地区优快钻井亟待解决的关键技术难题。

(2)从浅层水控制、泡沫定向钻井技术试验、井漏的预防与处理、空气钻防斜打直工具研发、页岩气水平井油基钻井液固井对策以及“井工厂”钻井作业模式攻关与应用等 6 个方面提出了克服四川盆地及周缘页岩气水平井面临挑战的技术对策,为后期技术方案优化和科研攻关提供了参考与借鉴。

(3)页岩气水平井钻井装备和施工经验相对缺乏,需开展广泛的对外合作,通过“产-学-研”相结合的方法,加大研究力度,力争短期内掌握页岩气水平井优快钻井的核心技术,打破北美国家技术垄断的局面,为我国页岩气的商业化开发提供有效的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] S. L. Sakmar. Shale gas developments in north America: an overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry[J]. SPE 144279, 2011.
- [2] Aaron Padila. Social responsibility & management systems: elevating performance for shale gas development [J]. SPE 156728, 2012.
- [3] Faraj B, Williams H, Addison G, et al. Gas potential of selected shale formations in the western Canadian sedimentary basin [J]. Gas TIPS, 2004, 10(1): 21 - 25.
- [4] Z. Dong, S. A. Holditch, et al. Global unconventional gas resource assessment [J]. SPE 148365, 2011.
- [5] 郑军卫,孙德强. 页岩气勘探开发技术进展 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 511 - 517.
- [6] 张金川,徐波. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136 - 140.
- [7] Jugal K. Gupta, Matias. G. Zielonka, et al. Integrated methodology for optimizing development of unconventional gas resources [J]. SPE 152224, 012.
- [8] 黄玉珍,黄金亮. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 7 - 10.
- [9] 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 - 40.
- [10] 刘伟,陶谦,丁士东. 页岩气水平井固井技术难点分析与对策 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(3): 40 - 43.
- [11] 吴仕荣,邓传光,周开吉. 空气钻井地层出水限定值的探讨 [J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 7 - 8.
- [12] 罗整,徐忠祥. 空气钻井井斜控制技术的探讨 [J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 17 - 19.