

# 页岩气开发钻完井技术探讨

王建华<sup>1</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 张进<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中石化华北分公司, 河南郑州 450006)

**摘要:**我国广泛分布着丰富的页岩气资源, 开发应用远景良好。通过借鉴、转化、应用常规油气开发的成熟技术, 可集成配套形成页岩气开发钻完井技术系列。水平井已成为页岩气开发的主要钻井方式, 结合旋转导向、MWD/LWD、三维地震和欠平衡钻井等工艺技术的集成应用可提高开发效率。水力压裂工艺已成为页岩气开发的主要技术, 随着清水压裂、重复压裂、同步压裂等技术的发展, 页岩气的勘探开发更具发展潜力。

**关键词:**页岩气; 钻完井技术; 水平井; 压裂

中图分类号: TE37 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2015)10-0001-05

**Complete Drilling and Completion Technology for Shale Gas Development/WANG Jian-hua<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, ZHANG Jin<sup>1</sup>**  
(1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. SINOPEC North China Division, Zhengzhou Henan 450006, China)

**Abstract:** China is very rich in shale gas resources with great development potential. It is possible to form a series of complete drilling and completion technology for shale gas development through borrowing, converting and utilizing of well-proven conventional oil and gas development technology. Horizontal drilling has dominated the drilling methods for shale gas development, and integrated with rotary steerable drilling, MWD/LWD, 3-D seismic survey, and under-balanced drilling, it will increase development efficiency. Hydraulic fracturing is a main technique for stimulation of shale gas reservoirs. Advances in slick water fracturing, re-fracturing, synchronized fracturing, etc., will make shale gas development more promising.

**Key words:** shale gas; drilling and completion technology; horizontal well; fracturing

页岩气属于非常规天然气, 主要储集在超低渗的致密页岩中。页岩既是页岩气的原生源岩, 也是聚集和保存页岩气的储层和盖层, 物性上呈低孔、低渗等特点, 开发特性上呈开采寿命长、生产周期长, 采收率变化大且低于常规天然气井的采收率。页岩的物性、岩页岩的开发特性决定了其开发难度, 就目前来说, 页岩气开发还没有自己特定的技术, 其关键是成功地借鉴和应用常规油气勘探开发的成熟技术, 钻井尽可能多地横贯储藏有岩页岩的储层, 完井尽可能多地构建岩页岩泄流裂缝或通道, 开采尽可能多地创建释放被束缚页岩气条件。近年来, 美国、加拿大等在页岩气勘探开发方面成功地进行了常规油气勘探开发成熟技术的转化和应用, 并积累了丰富的经验, 创造了成功应用的典范, 形成了配套的水平井钻井、水力压裂等页岩气开发的钻完井技术系列。

## 1 我国页岩气钻完井技术现状

近年来, 随着能源需求的不断增大, 常规化石能源的日益需求消耗膨胀及消费结构的转变, 导致非

常规油气资源的开发利用日益升温, 美国、加拿大等成功开发利用页岩气的经验在全球引发了“页岩气革命”。2009 年国土资源部重庆綦江页岩气资源勘查项目的启动, 中石油第一口页岩气井——“威 201 井”的开钻, 2010 年中石化第一口页岩气井——“河页 1 井”的开钻, 标志着我国已正式启动页岩气资源的勘探开发。2012 年 3 月国土资源部《页岩气“十二五”规划》公布我国页岩气可采资源为  $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。2013 年中石化涪陵区焦石坝页岩气先导试验项目取得重大进展, 预期 2017 年建成  $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  产能, 展现了页岩气开发利用的良好远景, 也预示着我国页岩气的勘探开发已进入机遇或黄金期。

我国在页岩气勘探开发方面尽管还处于起步阶段, 但在引进、消化、应用成功经验上已取得重大进步, 重庆彭水、四川威远等区块页岩气藏资源的勘查已取得良好效果。因受页岩气配套钻完井技术成熟和转化程度的制约, 也暴露出页岩气配套钻完井技术在应用方面的问题, 常规天然气开发的成熟技术, 国外页岩气的配套钻完井技术不能直接复制、移植,

收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-09-24

基金项目: 河南省“两权价款”地质科研项目“页岩气钻探技术研究”(2013-09)

作者简介: 王建华, 男, 汉族, 1963 年生, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事勘探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, wangjh@mail.cgs.gov.cn。

必须根据现场客观情况进行有效的取舍;各区域页岩气储层的物性、裂隙发育程度、气体吸附特征乃至埋深等差异会影响、甚至决定相关配套钻完井技术的应用效果;页岩气的完井工具、压裂等工艺技术正处于快速发展阶段,其压裂效果、成本费用、环境保护等问题会直接影响配套完井技术的规模应用<sup>[1-5]</sup>。

## 2 页岩气开发的配套钻完井技术

随着水平井、分支井等钻井工艺技术、工具、装备的不断成熟和发展,随着分层压裂、分段压裂、清水压裂、重复压裂、同步压裂等储层改造配套工艺技术、工具、装备“瓶颈”问题的突破,随着常规油气勘探开发成熟技术的转化和应用,我国页岩气的开发将会进入一个快速发展的机遇期。

### 2.1 页岩气钻井特点与要求<sup>[6-9]</sup>

页岩储层发育一定的孔隙、裂缝(主要发育垂直裂缝),页岩气主要吸附在孔隙结构或赋存在孔洞、裂缝中,因此页岩气钻井要围绕储层的孔隙、裂缝系统展开,尽可能使井筒横贯储藏中更多的孔隙、裂缝,尽可能多地利用其自身储层裂缝的导流能力以获得较高的产量,从而催生水平井成为页岩气开发的关键或主流技术(参见图1),常规直井则多用于探井。

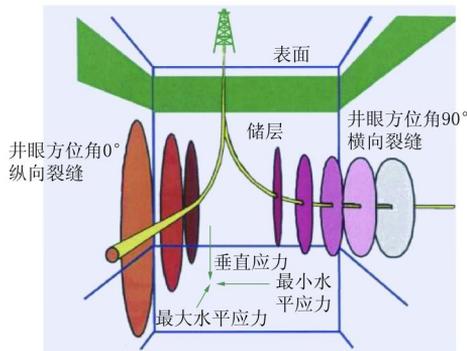


图1 页岩气水平井钻井示意图

#### 2.1.1 水平井钻井的特点与难点

随着常规油气勘探开发的不断实践和应用,随着欠平衡钻井、控压钻井、旋转导向钻井等新工艺新技术的不断集成,已形成包括井眼轨迹优化和控制、井眼稳定、井眼清洗、减摩降阻、下套管、固井等配套技术系列。随着相关难点问题、“瓶颈”问题的突破,为页岩气水平井钻井技术的转化、应用、熟化奠定了坚实的基础。水平井钻井会因储层物性、钻井特点等影响导致井眼失稳、岩屑床、高摩阻等难点问题。

(1)井眼失稳:页岩气储层的层理及微裂缝发

育,揭开储层后钻井液滤液进入其层理间隙,水敏性会使页岩内部的粘土矿物遇水膨胀,形成新的孔隙或膨胀压力,削弱围岩结构力,导致井眼周围的应力场变化及井壁的稳定性变差、井壁失稳。

(2)高摩阻、高扭矩:水平段钻进时,破岩扭矩及钻具与井壁的摩擦会随水平段延长而加剧,会产生较高的摩阻和扭矩,会导致起下钻的负荷、阻力明显增加,会导致钻具屈曲、滑动拖压等问题。

(3)岩屑床清理困难:随着井斜角的增加岩屑重力效应加强,钻井液携岩净化能力变差,当井斜角超过 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 时在井眼低边的开始形成岩屑床,泥页岩的崩塌、掉块等会进一步强化岩屑床问题,增加井下摩阻、扭矩,提高井下事故的复杂发生的机率。

(4)轨迹控制困难:页岩气储层因孔隙、层理、微裂缝发育而疏松,导致井眼的稳定性差,机械钻速高,井径变化大,扭矩规律性不强,定向工具面摆放困难等轨迹控制问题。频繁变化的扭矩、托压、岩屑床等问题会严重干扰定向工具、钻头作用力方向控制和井眼轨迹调节的实际效果。

(5)套管下入困难:定向造斜段及水平段岩屑床的清理、高摩阻、高扭矩、托压等问题,会导致滑动钻进时易形成一个个小台阶,易在“狗腿度”较大的井段形成键槽等,从而影响井眼轨迹的平滑,影响井眼质量。这些因素增加了套管能否安全下至地质设计井深的风险。

(6)技术套管磨损严重:页岩气水平井追求最大限度横贯储层,受井身结构的制约,钻具组合选择的局限性较大,钻具的屈曲、涡动等易导致套管偏磨,过大的扭矩、摩阻也易诱导钻具失效事故。

(7)固井质量差:斜井段及水平井段会因管串组合、套管居中度、井眼清洁程度、顶替效率、井眼漏失等问题影响水泥浆胶结质量和固井效果。

#### 2.1.2 水平井钻井的配套措施

页岩气水平井要从井眼轨迹设计、钻具组合优化、井眼轨迹控制、测量和导向工具的选择与使用、井眼稳定与清洁、下套管与固井等配套技术入手,采取有效措施解决页岩气水平井钻井中的难点和关键问题。

##### 2.1.2.1 井眼轨迹的设计优化

目前多以浅层大位移、丛式、阶梯、分枝等水平井开发页岩气,以最大限度地横贯更多的储层发育的孔隙、裂缝,以最大限度地获得更大的储层泄流面积,以显著地改善井筒周围的储层流体的渗流状态

为目的。关键是充分利用三维地震及储层应力资料选择页岩气富集区,在保证井眼轨迹沿最小水平应力方向尽可能多地横贯页岩气富集程度高的地层或裂缝的前提下,尽可能规避井漏、断层等工程复杂问题,确保预期的压裂裂缝与井眼方向垂直,提高储层改造效果奠定基础。为此,美国、加拿大等实践引用了“井工厂”,通过井眼轨迹的优化设计,以最大限度地延伸和最大化开发井网覆盖范围,减少和规避地面不利条件,简化地面工程及后期生产管理。

#### 2.1.2.2 测量和导向工具

水平井施工需要配套 MWD、LWD、EM - MWD、SWD、GST 等随钻测量及地质导向工具。MWD 能实时提供井斜、方位等定向钻井监控参数;LWD 能实时提供地层岩性、流体状况等地质信息;SWD 能实时提供待钻地层岩石类型、孔隙度、孔隙压力及声学敏感参数;LWD、SWD、GST 等能实时识别地层修正井眼轨迹,确保井眼轨迹始终沿储层钻进。合理选择、使用测量和导向工具,及时根据储层变化精确地定位和评价地层,适时调整井眼轨迹或引导中靶地质目标,并通过不同的滑动钻进、复合钻进组合提高水平井段的机械钻速,规避井下复杂和事故,化解水平井“扭矩高、摩阻大、机械钻速低及轨迹控制难”等常见的“瓶颈”或难点问题。

#### 2.1.2.3 井眼稳定与钻井液

油基钻井液具有良好的润滑防卡和降阻作用,是国内外前期采用最多的钻井液体系,主要通过提高页岩的水润湿性和毛细管压力,削减滤液的水敏作用来保持井壁稳定。水基钻井液具有良好的抑制性和封堵能力,是国内外目前采用最多的钻井液体系,或利用低活性高矿化度聚合物降低页岩和钻井液相互作用的总压力,或利用浓甲酸钾盐脱水孔隙压力降低或影响近井壁区域化学变化的协同作用,或对裂隙裂缝或层理发育层段进行封堵等来提高井眼稳定性。

页岩多发育孔隙、裂缝,水敏性极强,井眼的稳定和钻井液的选择极其重要,不仅要面对常见的井壁稳定、减摩降阻、润滑防卡和清除岩屑床等水平井钻井液难点问题,还要面对泥页岩的垮塌、缩径、漏失及由此带来高摩阻、携岩困难等问题,同时还应围绕高效低成本水基钻井液和低毒油基钻井液开展研究,减少地层污染保护环境。

#### 2.1.2.4 完井工具和工艺方法

完井工具、工艺、方法对完井方式和后期的压裂改造影响巨大,根据工具、工艺、方法的不同可细分为裸眼和套管等不同的完井方式。裸眼完井虽成井快、作业周期短、储层伤害轻,但缺少井壁支护易垮塌,后期储层改造难度大、要求高;套管完井虽成井慢、作业周期长、储层伤害大,但井筒稳定能满足储层改造要求。

目前多以三级结构套管完井为主,随完井工具、工艺、方法的发展又可细分为组合式桥塞完井、水力喷射射孔完井和机械式组合完井等工艺方法。选择不同的完井工艺方法,最大限度地满足不同井型、不同储层、不同压裂工艺方法的要求,实现多层多段同步压裂或分层分段压裂改造,最大限度地构建和联通页岩气泄流通道,提高储层改造效果。

#### 2.1.2.5 固井工艺方法

水平井固井可以分为常规水泥固井、泡沫水泥固井和酸溶性水泥固井等。常规水泥浆固井作业成本低、技术成熟;泡沫水泥固井防窜效果好,能有效解决低压易漏长井段封固问题;酸溶性水泥固井具有良好的暂堵性,能盐酸解堵,防止射孔孔洞和压裂裂缝堵塞。合理地规避水泥浆窜槽、自由水控制、钻屑清除、管柱居中等不利因素,合理地组合和使用套管扶正器、刮泥器、紊流器、管外封隔器、旋转尾管下入工具等,对优化管串结构,确保套管柱居中,控制环空窜槽至关重要。合理地选择和优化水泥浆体系,优化隔离液、前置液及顶替排量等固井工艺的设计,对降低水泥浆析水,提高水泥浆顶替效率至关重要。

### 2.2 水力压裂技术<sup>[10-13]</sup>

水力压裂是页岩气开发可借鉴的有特色的或者说关键的技术,页岩基质的渗透率很低,完井后90%以上需经酸化、压裂才能获得比较理想的产量。目前随着完井工具、工艺、技术的发展,逐渐形成了以水平井套管完井、分簇射孔、快速可钻桥塞封隔、大规模滑溜水或滑溜水+线性胶分段压裂、同步压裂等水力压裂技术系列,并实现了以“体积改造”为目的的储层改造技术。

#### 2.2.1 多级可钻桥塞分段压裂

多级可钻桥塞分段压裂技术的特点是分段分簇射孔、可钻桥塞封隔、套管双封分段压裂(见图2)。一般情况,水平井段可分8~15段,每段100~150m,射孔4~6簇,簇间距20~30m,每簇跨度0.46~0.77m,压后裂缝间应力干扰明显,形成的缝网更加

复杂,改造体积更大,压裂效果更好,压后可快速钻掉桥塞进行测试、生产,但需下入工具打捞桥塞,存在砂埋或砂卡的风险。



图2 可钻桥塞分段压裂示意图

可钻桥塞分段压裂的核心工具是可钻桥塞,关键是射孔、坐封、桥塞联作管柱的组合和下入,压后

能在很短时间内钻掉桥塞,可大大减小压裂液在地层中的滞留时间和消减储层伤害。

## 2.2.2 封隔器分段压裂

### 2.2.2.1 多级滑套分段压裂

多级滑套封隔器分段压裂的关键技术是通过井口落球系统操控滑套(参见图3),与直井投球压差封隔器原理相同,可实现套管或裸眼多段单独压裂,施工时间短、成本低。压裂段数取决于滑套级数以及所控制的级差,级数越多控制要求越精确,下入的工具串次数越多施工风险越大,封隔器的坐封压力及工艺过程等越复杂,但任何一个环节的处理不当都会导致施工失败。

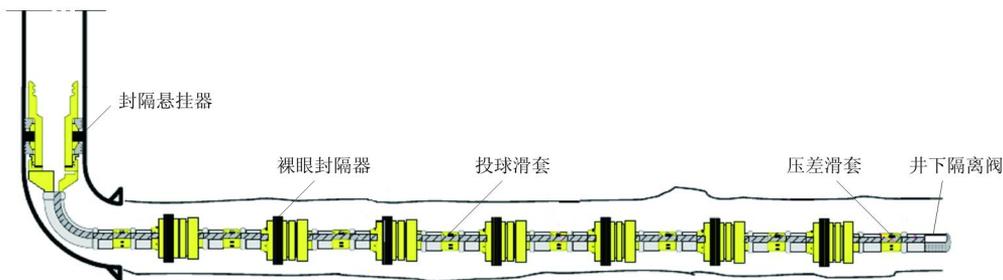


图3 多级滑套封隔器分段压裂示意图

### 2.2.2.2 膨胀式分段压裂

膨胀封隔器分段压裂的关键技术是膨胀封隔器,组合膨胀封隔器分段压裂管柱,将封隔器下至预定位置后,封隔器遇油(遇水)自动膨胀坐封,可封隔不规则的井眼实现分层分段(参见图4),可靠性高、作业成本和风险低,压后可快速试气投产。但因封隔器膨胀时间长(7~10天),胶筒膨胀完毕后不收缩,始终紧贴井壁无法解封等局限性,影响其推广应用。

则的井眼实现分层分段(参见图4),可靠性高、作业成本和风险低,压后可快速试气投产。但因封隔器膨胀时间长(7~10天),胶筒膨胀完毕后不收缩,始终紧贴井壁无法解封等局限性,影响其推广应用。

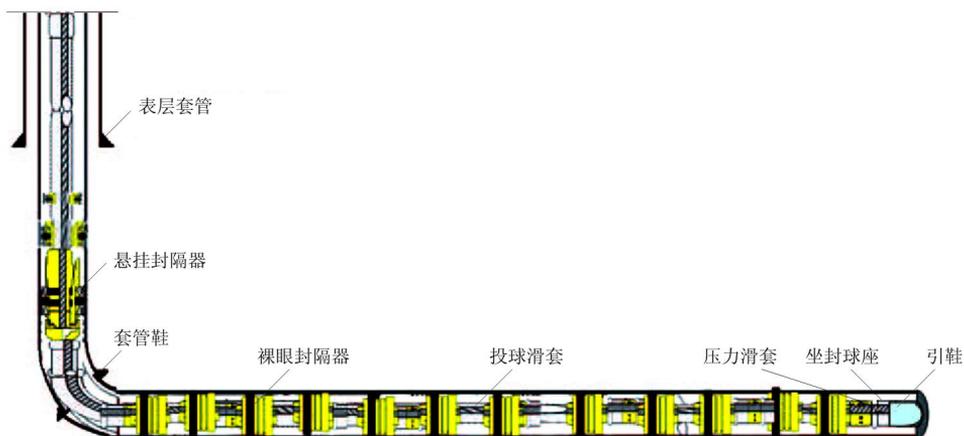


图4 裸眼封隔器分段压裂示意图

### 2.2.2.3 水力喷射分段压裂

水力喷射是一项集射孔、压裂、封隔于一体的新型增产改造技术,可用于套管完井、筛管完井和裸眼完井。根据喷射管柱的不同可分为拖动管柱和不动管柱水力喷射分段压裂等。

不动管柱滑套水力喷射分段压裂的关键技术是采用多套喷枪组合并配套滑套开关(参见图5),对某一层段完成水力喷射压裂后无需移动喷射管柱,通过投球或其他方式打开欲压裂层段滑套实施压裂施工;拖动管柱水力喷射分段压裂的关键技术是通

过连续拖动施工管柱进行水力喷射射孔、压裂,完井套管串中不需组合封隔器或桥塞等封隔工具。

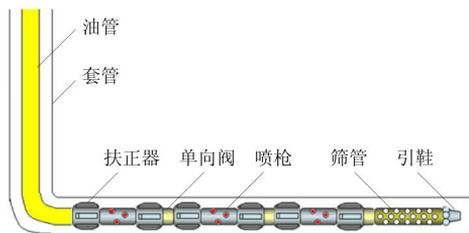


图5 不动管柱水力喷射分段压裂示意图

#### 2.2.2.4 多井同步压裂

作为“井工厂”的特色或标志技术,多井同步压裂主要用于两口或多口邻井同时分段多簇压裂,或邻井间拉链式交替压裂,以便让储层的页岩承受更高的压力,增强邻井间的应力干扰,产生更加复杂的裂缝网络,最终改变近井地带的应力场,实现体积改造之目的。

#### 2.2.3 压裂液技术

压裂规模大、入地液量多是页岩气储层改造的特色,受资源、成本、环保等因素的制约,使滑溜水、线性胶、交联液和泡沫等水基压裂液成为首选,滑溜水和复合压裂液是目前现场主要的压裂液体系。

(1)滑溜水压裂液:滑溜水是一种添加了降阻剂、粘土稳定剂及助排剂的低摩阻、低伤害、低成本的清洁压裂液,主要用于无水敏、裂缝发育、脆性储层。能满足页岩气的孔隙、裂缝性储层的改造,可提高形成剪切缝和网状缝的概率,且具降阻稠化剂用量少,支撑剂用量少,对地层伤害小,成本低等特点。

(2)复合或混合压裂液:常规胍胶压裂液破胶后,其残留固相残渣会污染地层,降低压裂改造效果。清洁的复合或混合压裂液具有良好的粘弹性、高界面活性、剪切稀释性及破胶后无残渣等特点,可用于高粘土含量、强塑脆性的页岩气储层。压裂时,配合滑溜水前置液与冻胶交替注入,既可保证形成一定的缝宽,又保证有一定的携砂能力,较好地解决了吸附滞留、润湿反转、储层伤害等问题。

#### 2.2.4 裂缝监测技术

压裂网络缝高、缝长最大化是页岩气储层体积改造的终极目标,裂缝监测在页岩气压裂改造中占有重要地位,监测手段包括化学示踪剂法、物理示踪剂法、同井和邻井微地震监测等。通过裂缝监测可以监测压裂效果,预测或计算裂缝方位、改造体积、泄流面积及预测产量等,为新井布井提供参考。

### 3 认识与结论

(1)我国有广泛分布的丰富的页岩气资源,页岩气开发应用的远景良好。

(2)水平井钻井是页岩气主要开发方式,随着水平井钻井优化设计技术、井眼轨迹控制技术、下部钻具组合优选,确保施工安全和防止油层污染的钻井液完井液技术,组合完井工艺等技术及大扭矩多级马达、可控弯接头、变径稳定器、水力加压器、高效PDC钻头工具,MWD和LWD等仪器的集成应用,可有力推进页岩气的高效开发。

(3)提高页岩气水平井固井质量的关键手段是提高水泥浆顶替效率,紊流器、刮泥器、套管扶正器和旋转尾管下入工具的合理选择与应用,对提高固井质量至关重要。

(4)水平分段压裂是页岩气开发的关键技术,应在充分认识储层的基础上,综合考虑井身条件、完井方式、投产方式等因素,推广应用适用的储层压裂改造技术,在很大程度上会对降低施工成本,提高单井产量,具有现实指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 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).
- [2] 黎红胜,汪海阁,纪国栋,等.美国页岩气勘探开发关键技术[J].石油机械,2011,39(9).
- [3] 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).
- [4] 蒋国盛,王荣璟.页岩气勘探开发关键技术综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1).
- [5] 刘德华,肖佳林,关富佳.页岩气开发技术现状及研究方向[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2011,33(1).
- [6] 王金磊,黑国兴,赵洪学.昭通YSH1-1页岩气水平井完井技术[J].石油钻探技术,2012,40(4).
- [7] 闫联国,周玉仓,彭页HF-1页岩气井水平段固井技术[J].石油钻探技术,2012,40(4).
- [8] 王中华.页岩气水平井钻井液技术的难点及选用原则[J].中外能源,2012,17(4).
- [9] 臧艳彬,白彬珍,李新芝,等.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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(5).
- [10] 薛承瑾.页岩气压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2011,39(3).
- [11] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,等.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4).
- [12] 孙海成,汤达祯.四川盆地南部构造页岩气储层压裂改造技术[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(S1).
- [13] 郭凯,秦大伟,张洪亮,等.页岩气钻井和储层改造技术综述[J].内蒙古石油化工,2012,(4).