

引用格式:张国荣,王俊方,张龙富,等.南川常压页岩气田高效开发关键技术进展[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):365-376.

ZHANG Guorong, WANG Junfang, ZHANG Longfu, et al. Key technical progress in efficient development of Nanchuan normal-pressure shale gas field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):365-376.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.011

## 南川常压页岩气田高效开发关键技术进展

张国荣,王俊方,张龙富,陈士奎  
(中国石化华东油气分公司,江苏南京210019)

**摘要:**针对南川页岩气田开发中存在的地质条件复杂、钻井漏失垮塌、压裂改造效果不理想、缺少有效人工举升等问题,通过对钻完井技术、压裂技术及采气技术进行深入研究,完成了开发工艺技术的优选、集成与改进,形成了常压页岩气高效钻完井技术、高效压裂技术和页岩气井排水采气技术等一体化开发技术。其中常压页岩气高效钻完井技术,主要包括井身结构优化、钻头与螺杆一体化提速工艺、极限参数钻井工艺、高效完井工艺;高效压裂技术主要包括一体化全电压力裂工艺、一体化滑套完井压裂工艺、组合暂堵转向工艺等;适用的常压页岩气井排水采气技术主要包括单管射流泵和机抽排采两种工艺。通过上述技术推广应用,在南川区块形成了完整的针对不同区域、不同井深的常压页岩气田高效开发工艺技术系列,推进了常压页岩气田降本增效开发。

**关键词:**常压页岩气;南川地区;一体化工艺技术;钻完井;电动压裂;人工举升

中图分类号:TE25

文献标识码:A

### Key technical progress in efficient development of Nanchuan normal-pressure shale gas field

ZHANG Guorong, WANG Junfang, ZHANG Longfu, CHEN Shikui

(Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

**Abstract:** In order to solve the problems existing in the development of Nanchuan Shale Gas Field, such as complex geological conditions, drilling leakage collapse, unsatisfactory fracturing effect and lack of effective artificial lifting, the optimization, integration and improvement of development technologies have been completed through in-depth research on drilling and completion technology, fracturing technology and gas production technology, and integration development technologies such as high-efficiency drilling and completion technology, high-efficiency fracturing technology and shale gas well drainage and gas production technology have been formed. Among them, the high-efficiency drilling and completion technology of normal-pressure shale gas mainly includes wellbore structure optimization, bit and screw integrated speed-up technology, limit parameter drilling technology and high-efficiency completion technology; high-efficiency fracturing technology mainly includes integrated all-electric pump fracturing technology, integrated sliding sleeve completion fracturing technology, combined temporary plugging steering technology, etc.; the applicable drainage and gas recovery technology of normal pressure shale gas well mainly includes two processes: single pipe jet pumping and mechanical pumping. Through the popularization and application of the above technologies, Nanchuan Block has formed a complete series of high-efficiency development technologies for normal-pressure shale gas fields in different areas and different well depths has been formed in Nanchuan Block, which has promoted the development of normal-pressure shale gas fields with reduced costs and increased efficiency.

**Key words:** normal-pressure shale gas, Nanchuan area, drilling and completion, integration technology, electric fracturing, artificial lifting

收稿日期:2020-12-01。

第一作者简介:张国荣:(1968—),男,博士,教授级高级工程师,本刊第二届编委会委员,从事油气勘探开发研究相关工作。地址:重庆市南川区渝南大道10号中国石化重庆页岩气有限公司,邮政编码:408400。E-mail:zhanggr.hdsj@sinopec.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

南川常压页岩气田主体位于武陵褶皱带。该区构造演化经历了多期构造运动,其中以加里东—海西期、印支期、燕山—喜山期构造作用影响最大。在加里东—海西期,构造活动方式以升降、拉张为主,区域上呈现隆坳相间的古构造格局,沉积特点表现为被动大陆边缘稳定的旋回性坳陷沉积,广泛发育的海相碳酸盐岩夹碎屑岩为主的沉积建造;印支期的大陆碰撞,由张性环境转向挤压,使四川盆地由被动大陆边缘转入前陆盆地沉积;晚燕山—喜山期,川东南地区受SE—NW向强烈应力作用,在持续挤压和走滑的作用方式下,形成了背、向斜相间的“槽—挡”式构造特征,平面上呈“S”形或弧形复式背、向斜褶皱。

南川地区页岩气储量规模大,主要发育平桥、东胜、阳春沟3个千亿立方米级储量阵地的构造带,目前已累计探明 $1\ 989.64\times 10^8\text{ m}^3$ 地质储量,具备建成 $25\times 10^8\text{ m}^3$ 产能的资源基础;已建成产能 $15.4\times 10^8\text{ m}^3$ ,2016—2017年在平桥南区开展 $6.5\times 10^8\text{ m}^3$ 产建,2018年启动JY10井区滚动建产,2019—2020年启动东胜区块。

与涪陵页岩气田高压、超高压页岩气井相比,南川气田具有明显的常压页岩气生产特征,气藏类型为常压中低产,压力系数1.0~1.3,单井产能 $(4.5\sim 6.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,单井EUR(最终可采储量)为 $(0.6\sim 1.0)\times 10^8\text{ m}^3$ 。

南川气田自2016年开始产建,围绕开发的3大核心工艺技术——钻井、压裂、采气技术上存在的问题,南川页岩气项目部开展了大量的技术研发与集成工作,以现场实践为手段,不断完善改进常压页岩气钻井、压裂、采气技术,已形成一系列高效的开发技术并在工区内推广应用。

## 1 勘探开发现状

南川常压页岩气田自2016年开始开发,先后在平桥南、JY10井区、东胜等区块建产,目前已建产能 $10.7\times 10^8\text{ m}^3$ ,其中生产井91口,日产气量 $355\times 10^4\text{ m}^3$ ,日产水量 $1\ 321\text{ m}^3$ 。气田地处川渝地区,地形以山地为主,人口稠密,区块地质条件复杂,气田投入产建开发以来在钻完井、压裂、采气等方面存在诸多的技术难点。

### 1.1 钻完井技术难点

南川地区页岩气目的层埋深3 000~4 200 m,其

中龙马溪组压力系数1.0~1.3,属常压页岩气。该地区地质条件复杂,差异性大,平桥南区块地表以嘉陵江组为主,JY10井区和东胜区块地表以须家河组或雷口坡组为主。目前主要存在以下技术难点。

#### 1.1.1 浅表层钻井漏失垮塌严重

雷口坡—嘉陵江组溶洞裂缝发育,部分井段地层破碎,易发生失返性漏失且伴有大量掉块,卡钻风险高;尤其在东胜背斜北部,多口井钻井周期超100 d,其中SY3-1井钻遇31 m高溶洞,洞内存在大量鹅卵石,处理无果弃井。

#### 1.1.2 上部井段防碰难度大

工区地处西南山区,井场面积有限,平台部署井位多(DP2平台部署17口),浅层气井、页岩气井立体开发,井网交错,采气、压裂、钻井同平台作业,带来上部井段防碰及井控高风险。

#### 1.1.3 设备工具配套不完善

钻头、螺杆工具不配套,钻机设备老旧(半数以上钻机未配备52 MPa高压泥浆泵及配套地面高压管汇,高速离心机配备占比67%,1 200 kW网电电机配备占比17%,450双电顶驱配备占比58%,工区内仅一台全电动钻机),激进参数钻井无法全面推广,制约了钻井工程提速提效。

#### 1.1.4 目的层漏失、垮塌严重

JY10井区目的层龙马溪组漏失严重,JY204平台3口恶性漏失井累计漏失油基钻井液2 168 m<sup>3</sup>。地层破碎,JY203-1HF等井多次发生掉块卡钻事故,其中LY3HF井埋钻回填2次。

#### 1.1.5 地质导向困难

主力产层为龙马溪组龙一段①—③小层,其中东胜区块小层平均厚度分别为6,1.5,7.5 m,层薄且起伏大,地质导向困难,追层易造成工程复杂,JY208-3HF、SY9-1HF均发生地质回填侧钻。

## 1.2 压裂技术难点

### 1.2.1 压裂施工能耗高、噪音大

常规车组单井施工需柴油300 t,施工时噪音达

115 dB,单井碳排放量相当于200 t标煤。传统压裂施工车组单机功率小、能耗高、费用高、污染大、噪音大,严重制约页岩气的可持续开发。

### 1.2.2 压前井筒准备周期长

压裂施工前的井筒准备常见工序为通探洗和首段射孔,但这种方式施工周期长、费用高、影响压裂搬迁安装,完成工序需6 d,严重影响压裂提速提效。

### 1.2.3 簇间段间储层改造差异大

南川常压页岩气水平井,受地质上非均质性影响<sup>[1]</sup>,压裂施工中簇间、段间改造差异性大,难以得到全面均匀地有效改造<sup>[2]</sup>,不能实现水平段充分有效利用。

### 1.2.4 复杂井眼钻塞难、工序多

页岩气井采用复合桥塞压裂施工后<sup>[3]</sup>,需通过连续油管钻除<sup>[4]</sup>,并进行多次强磁打捞处理才能为后续的采气工艺提供合格的井筒条件。国产化的复合桥塞虽降低了工具成本,但随着勘探开发的进行,井眼轨迹控制难度增加,三维井眼、长水平段、上翘型水平井逐渐增多,作业难度也随之增加,连续油管钻塞作业易遇卡、强磁次数增多、工时延长等问题凸显。

## 1.3 非自喷阶段缺乏有效的排水采气技术

常压页岩气井<sup>[5]</sup>随着地层能量的衰竭,产量下降,气体瞬时流量降低,当低于最小临界携液流量后会造成井底积液,使之难以实现自喷生产,但目前国内<sup>[6]</sup>外缺乏非自喷阶段有效的排水采气技术。

## 2 工程技术进展

### 2.1 高效钻完井技术

#### 2.1.1 井身结构与井眼轨道优化

针对部分地层易漏易垮、提速与防碰矛盾的突出问题,根据各区块不同地质特点,由平桥南产建初期导管+三开制井身结构<sup>[7]</sup>,逐步发展为多序列井身结构,推广双二维轨道设计,实现“源头提速”。

##### 1) 井身结构优化

针对东胜构造带浅表层复杂的构造特征,推广浅表层溶洞探测识别工艺,优选大地音频电磁和微洞探测法,为井位筛选、井身结构优化和井漏预防提供依据。

东胜背斜北部浅表层雷口坡、嘉陵江组溶洞裂缝发育,易漏垮,采用导管+三开制井身结构,平台第一口井备用一级层序,漏、垮处理未果则下入备用套管;平台第二口井根据第一口井实钻情况优化井眼尺寸和套管下深(图1),提速降本。

东胜背斜南部、武隆区块等浅表层稳定区块,井身结构由“导管+三开制”优化为“导管+二开制”,实现源头提速,DP9、LY1井组等提速效果显著。

##### 2) 井眼轨道优化

将水平井轨道由三维优化为双二维,在每个铅垂面内只有井斜变化没有方位变化<sup>[8]</sup>,提前拉大防碰距,减少了碰套管风险,同时有利于韩家店、小河坝提速,且降低了定向施工难度及水平段摩阻。JY207平台采用双二维轨道布井后,分离系数均大于1.5(图2),更适合平台井布井及老平台补充井,目前

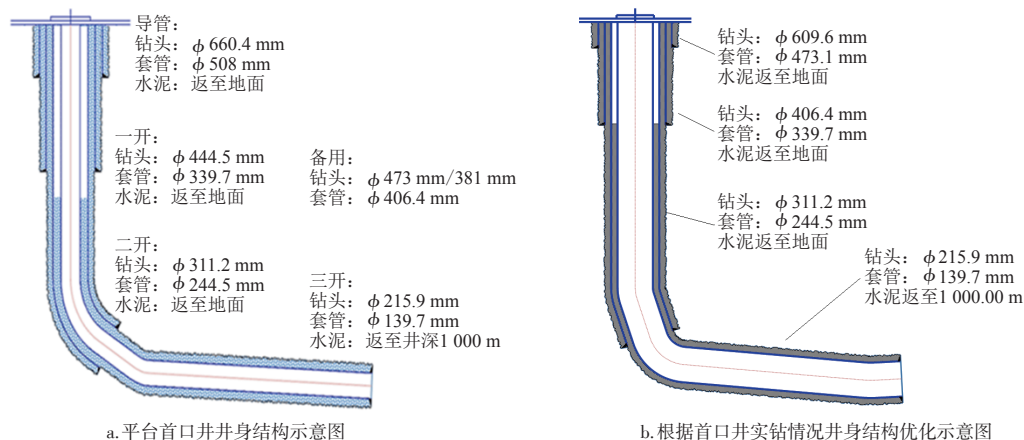


图1 浅表层复杂构造带井身结构优化方案

Fig. 1 Optimization scheme of wellbore structure in shallow complex structural zone

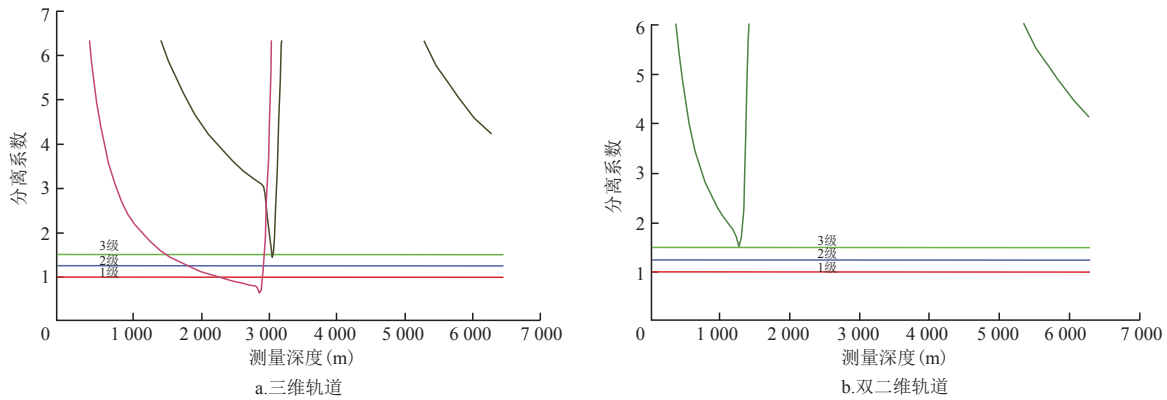


图2 焦页207-1HF、207-2HF、207-3HF井防碰扫描

Fig. 2 Anti-collision scanning of Well-JY207-1HF, Well-JY207-2HF and Well-JY207-3HF

DP2、DP9、DP14等平台普遍采用。

### 3) 中完原则及细节优化

根据工勘资料及实钻显示,嘉陵江一段地层稳定,表层套管封嘉陵江组优化为进嘉陵江一段,取消本开次防喷器安装,节省辅助时间。

东胜背斜、JY10井区、平桥南等区块坚持技套封小河坝进龙马溪组,避免类似JY203、JY207平台(单井漏失1 200 m<sup>3</sup>油基泥浆)因技套未下到位,造成不同压力层系的恶性井漏,堵漏困难,影响钻井效率、生产运行安排;武隆区块目的层压力低,韩家店、小河坝地层较稳定,技套中完层位优化至韩家店,依靠完井工艺优化实现生产套管顺利固井。

优化产层套管管串结构,浮箍以下填埋井段由45 m减少到23 m,节约了钻进时间和套管材料,单井费用节省8万元。

#### 2.1.2 钻头及螺杆一体化提速

平桥南产建以来,工区内存在钻头螺杆不匹配、厂家无序竞争、井队重复摸索等问题,影响钻井提速。为强化钻头螺杆配套,兼顾钻速与单趟进尺,实现寿命、钻参最优组合,2020年工区内推广应用钻头及螺杆一体化技术服务,取得理想效果。

##### 1) 难钻地层单趟进尺增加

二开( $\phi 311.2$  mm)钻遇地层从飞仙关至龙马溪组,是钻遇地层最多的开次,龙潭、茅口地层软硬交错、含燧石,小河坝研磨性强,可钻性差地层均在此开次,二开钻进占整个钻井周期50%左右,是提速重点井段。

根据“二开第一趟钻穿龙潭进茅口100 m、第二趟钻穿小河坝进龙马溪组”的设计理念,开展钻头与螺

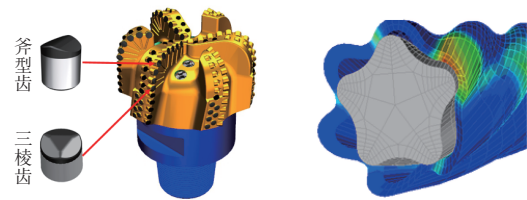


图3 新型高效先锋PDC+等应力马达

Fig. 3 New efficient pioneer PDC &amp; equal stress motor

杆的配套改进,实现龙潭、茅口去牙轮化。如SY14-7HF井,应用江钻高效先锋PDC+江钻低速大扭矩等壁厚螺杆一体化技术(图3),优化施工参数,工区内首次实现茅口至龙马溪组中完一趟钻,进尺1 215 m。

##### 2) 三开两趟钻逐步实现

为实现二开提速,定向任务基本留在三开( $\phi 215.9$  mm)井段,使用PDC钻头有工具面不稳定、造斜率低的缺点,使用牙轮钻头则机械钻速偏低,综合考虑三开造斜段长度在700 m以内,推广应用混合钻头,满足造斜率要求,日进尺超100 m,实现三开造斜段一趟进A靶点目标。

2020年新开钻井水平段长在1 300~2 200 m,平均段长1 694 m,据此优选钻头螺杆、钻参配套,2020年11口井实现水平段一趟钻<sup>[9]</sup>。其中在SY9-5HF井三开水平段应用江钻国产“钻头+螺杆”一体化服务,配合常规LWD+水力振荡器,通过优化施工参数,单趟进尺1 934 m,机械钻速11.18 m/h。

#### 2.1.3 极限参数钻井(常规LWD替代旋转导向)

通常用破碎单位体积岩石所耗能量来评价破岩效率的高低,对旋转钻井而言,破岩机械能量主要以在钻头上所加钻压和钻头转速的乘积来衡量<sup>[10]</sup>。采

用52 MPa高压泥浆泵为螺杆提供充足水功率,大扭矩螺杆实现钻压强化、钻头转速提高。

1) 极限参数选择

通过引进美国BICO大扭矩螺杆,实施极限参数钻井试验,BICO螺杆额定扭矩、压降是国产螺杆两倍以上(表1、图4),工区内现有钻机设备配置无法发挥进口螺杆全部性能,需进行升级改造。

2) 试验效果

基于目前钻机设备配套,形成推荐极限钻井参数<sup>[11]</sup>(表2)。通过试验,各开次机械钻速、单井钻井周期不断突破工区记录。

LY1-3HF应用BICO螺杆、优化钻头及钻具,充分释放钻井参数,用时5.71 d完成一开1 562 m进尺,机械钻速16.46 m/h,较设计提前7.29 d,创工区 $\phi 311$  mm井眼周期最短、钻速最快纪录。

SY9-4HF、SY9-5HF井水平段分别采用BICO、江钻 $\phi 172$  mm螺杆,配套LWD+水利振荡器,通过参数强化,单趟进尺分别达2 017, 1 934 m,机械钻速达10.44, 11.18 m/h,创工区螺杆使用记录;LY1井组在井斜角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的先天优势条件下, $\phi 215.9$  mm井眼连续破钻速记录,平均机械钻速达14.68 m/h,其中LY1-1HF井日进尺最高达473 m,创工区水平段日进尺最高纪录。

表1 244.5 mm SSS100(BICO)螺杆性能参数  
Table 1 Brief table of screw 244.5 mm SSS100 (BICO) performance parameters

排量范围 (L/s)	额定压降 (MPa)	额定扭矩 (N·m)	最大推荐钻压 (kg)	动力段配置	
				级数	头数
37.9 ~ 75.7	10.69	55 101	57 600	4.8	7/8

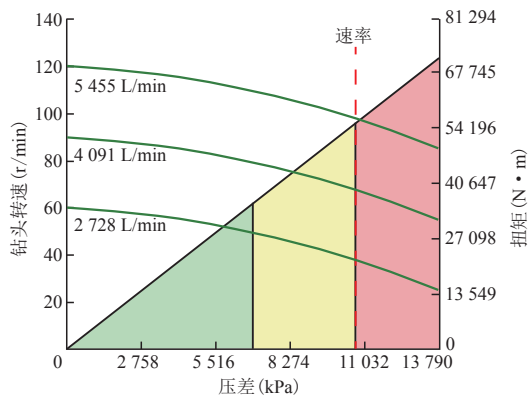


图4 244.5mm SSS100(BICO)螺杆基于理论估算值的性能曲线

Fig. 4 Performance curve of screw 244.5 mm SSS100(BICO) based on theoretical estimation

LY1-3HF、LY1-2HF井钻完井周期分别为28.52, 26.33 d,先后创重庆工区页岩气井钻完井周期最短纪录。

3) 常规LWD替代旋转导向

2020年工区采用常规LWD替代旋转导向,在目的层应用大扭矩螺杆+LWD导向模式,在保证目的层穿行率的前提下提高复合钻进占比,释放钻井参数,提速提效的同时进一步降低导向仪器费用。2020年使用LWD导向18口,钻遇率达96.8%。

SY9-4HF井水平段复合钻进占比73%,优质储层钻遇率100%,其中复合钻进机械钻速17.6 m/h,充分发挥了大扭矩螺杆复合钻进提速优势;同时常规LWD导向相比于旋转导向,仪器费用节约52%左右,可优化单井投资6%~7%,导向工具使用对比见表3。

2.1.4 高效完井工艺

平桥南产建初期,平均单井完井周期13.6 d,套管环空带压率约50%。通过承压堵漏技术向承压检验技术转换,以及“去通井、去短起、去测井”技术摸索,2020年平均完井周期降至6.5 d;通过水泥浆体系优化、预应力固井、水泥低返、气密封检测等固井技术集成,套管环空带压率由50%降至12.5%。

1) 承压检验技术

正常完钻井不进行承压堵漏,根据固井替浆时最大井底静态当量密度及固井循环摩阻,附加0.05当量密度,进行静态地层承压检验,若承压满足,则以固井时最大排量1.8 m<sup>3</sup>/min进行动态循环验漏;若

表2 工区内目前推荐参数

Table 2 Current recommended parameters in work area

钻头尺寸 (mm)	钻压 (t)	较常规提高 (%)	排量 (L/s)	较常规提高 (%)
311.2	16 ~ 20	43	59 ~ 64	8
215.9	14 ~ 16	60	33 ~ 34	13

表3 导向工具使用对比

Table 3 Comparison of guiding tools

轨迹控制方式	平均机械钻速 (m/h)	段长 (m)	周期 (d)	单价 (万元/d)	测量零长 (m)	复合钻进比例 (%)	井眼光滑度
LWD+水力振荡器	9	1 500	12	5	16 ~ 20	70 ~ 90	中
近钻头+水力振荡器	8.3	1 500	14	7.8	1.0 ~ 1.5	40 ~ 60	中
旋转导向	10	1 500	11	12.5	2.0 ~ 3.5	100	高

承压不满足,则以实际地层承压能力修改固井设计,同时进行动态验漏。

## 2) 环空带压预防措施

常规井采用双凝双密度弹韧性水泥浆体系(领浆最低密度  $1.43 \text{ g/cm}^3$ ),恶性漏失井采用充氮泡沫水泥浆体系(最低密度  $1.30 \text{ g/cm}^3$ ),保证水泥返高,提高防气窜及水泥石长效密封能力;升级技套为气密封,对下入的技套及产套进行气密封检测,防止套管间气窜;生产套管固井水泥返高由地面降到  $1\ 000 \text{ m}$ ,同时开展尾浆初凝加回压的预应力固井技术<sup>[12]</sup>,减少水泥失重影响。套管环空带压率大幅降低,同时减少水泥浆用量节约  $12 \text{ 万元/口}$ 、减少返出液处理费用  $5 \text{ 万元/口}$ 。

## 2.2 高效压裂技术

### 2.2.1 一体化全电静音压裂工艺

国内页岩气压裂主要采用压裂车组与常规柴油配套设备组合,需  $20$  台压裂车同时运转,压裂施工成本居高不下。为解决传统压裂车组单机功率小、占地面积大、费用高、污染大、噪音高、不能实现自动化精准控制的问题,工区  $2017$  年引入电动压裂泵<sup>[13]</sup>,经过单泵试验、规模应用、全电泵压裂、全电压裂4个阶段的发展,以现场运作为前提,不断改进优化升级电泵及配套设备,最终形成了一套完整的一体化全电静音压裂工艺。

该工艺以配套电网为保障,为压裂提供动力,用电动压裂泵作动力源,用电动混砂撬、电动供液撬、柔性水罐、电动混配撬、自动输砂储砂装置、集成系统控制房等工艺设备替代常规压裂配套设备,完成压裂施工的全电动化改造,实现压裂提速提效。

$2020$  年  $5$  月在  $DP2$  平台成功实现了全电压裂,开启了页岩气压裂的全新模式。 $DP2$  平台三口页岩气井施工时,井场大门处噪音下降至  $57 \text{ dB}$ (图5),结合无限级滑套,实现单井日压裂  $6.5$  段,日均  $3$  段,与初期同平台井压裂期间噪音扰民、不能  $24 \text{ h}$  施工、日均  $1.7$  段相比,全电压裂提速明显。

截至  $2020$  年  $11$  月,共计  $26$  口井  $493$  段实现全电动压裂,估算节约资金  $8\ 169$  余万元,平均单井节约  $314$  万元。

### 2.2.2 一体化滑套完井压裂工艺

压裂施工目前存在  $2$  个突出的问题:①井筒准备

阶段通探洗、首段射孔工序费用高、连油易自锁、周期长;②轨迹复杂、长水平段井日益增多,泵送工艺难以实现压裂提速。工区在调研国内外相关工艺的基础上,通过固井工艺的优化,结合趾端滑套和无限级滑套形成了全新的一体化滑套完井压裂工艺。

该工艺在固井上采用改进型胶塞+糖水缓凝压塞液+清水缓凝替浆液,固井水泥塞残留控制在  $10 \text{ m}$  以内;完井工具上采用趾端滑套<sup>[14-15]</sup>,无限级滑套随套管入井;首段压裂前通过井筒打压开启滑套(图6)连通地层,后续层段压裂时通过投入夹筒(带可溶球)开启无限级滑套(图7);压裂后放喷溶解可溶球,建立产气通道,实现了压裂工序的简化,提速提效。目前在  $SY2-2HF$ 、 $LY1-2HF$  井成功的实施了该工艺。

该工艺作业时间短,施工可靠,趾端滑套节约施工周期  $5 \text{ d}$ ;单段无限级滑套减少泵送桥塞联作施工时间  $4 \text{ h}$ ;可溶球溶解,无需钻塞,规避了连油作业、



图5 全电压裂施工井场布置

Fig. 5 Wellsite layout drawing of all-electric fracturing construction

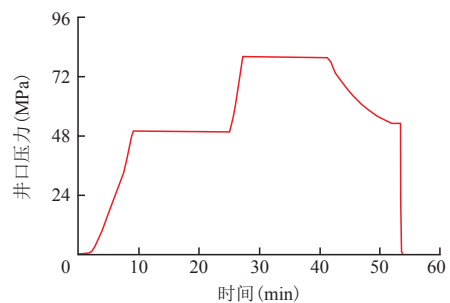


图6 趾端滑套开启曲线

Fig. 6 Opening curve of toe sliding sleeve

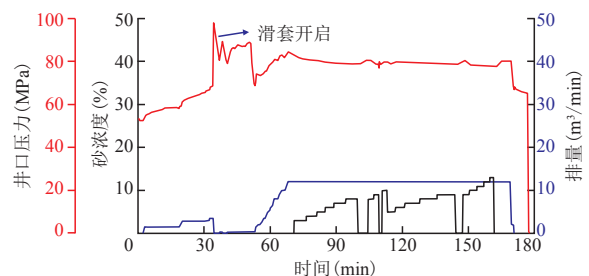


图7 无限级滑套压裂施工曲线

Fig. 7 Construction curve of infinite sliding sleeve fracturing

泵送的风险、节约了费用,提速提效明显;SY2-2HF井压裂期间,创下单井单日6.5段的施工纪录,LY1-2HF井单日8段再次刷新纪录,与采用泵送工艺压裂日均2.5段相比,优势明显。

截止2020年11月,趾端滑套累计下入20支,开启16支,开启成功率80%,无限级滑套下入45支,开启成功率100%。

按照1500 m水平段、105 MPa级别压裂测算,滑套施工节省费用43万元,提前10 d投产,单井日产 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增效90万元,并可规避泵送射孔、连油施工风险,在提速提效和规避施工风险上优势突出。

### 2.2.3 组合暂堵转向工艺

常规射孔方式,簇间距大,因平面非均质性,在压裂过程中更多的是形成相互独立的单一平面缝、裂缝复杂程度低,非常规储层类因特低孔低渗的特征而造成单缝缝控面积有限,储层增产效果欠佳。

国内外大量生产测井<sup>[16-17]</sup>和井下成像数据表明,多簇射孔水平井压裂时簇间孔眼进液差异大,射孔簇未完全压开,地质储量未得到有效动用。

通过页岩气体积压裂缝网分析<sup>[18-19]</sup>,提高缝内微裂缝的发育程度、减小簇间的压裂差异可有效改善压裂效果。通过前期调研和试验,成功解决这两项难题,并形成了自主的组合暂堵转向工艺。该工艺利用可溶暂堵球实现簇间暂堵,减小簇间改造差异;利用暂堵剂造复杂缝,并根据暂堵剂用量实现双暂

堵效果<sup>[20]</sup>,提高单簇裂缝复杂程度及改造体积,改善压裂体积改造效果(图8),实现压后产量提升。

该工艺在JY207平台首次试验即获得成功,利用暂堵剂与可溶暂堵球<sup>[16]</sup>实施缝内、簇间组合暂堵。累计使用暂堵剂2000 kg,可溶暂堵球573个,整体暂堵升压效果比较明显(图9)。

微地震检测显示:

1) 暂堵球成功实现了簇间暂堵,促进了非主流通道射孔簇的进液,减小了簇间非均质性造成的差异,实现射孔簇的全面改造(图10)。

2) JY207-1HF井实施缝内暂堵转向段平均破裂长度较常规压裂段长,平均破裂面积较常规压裂段大;实施缝内转向段与常规压裂段相比,形成的缝网更为复杂(图11)。

从试气产量来看,JY207-1HF井气产量 $23.37 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,JY207-2HF井气产量 $20.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,后期同平台JY207-4HF井(未采用组合暂堵工艺)气产量 $11.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

组合暂堵转向工艺实施的2口井在缝长、破裂面积、日产气量上均优于传统压裂井。

2020年JY204-1HF井实施该工艺同样稳产 $15.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,再次验证了该工艺的有效性,改善压裂效果显著。

### 2.3 适用的排水采气技术

目前国内针对中低压页岩气井的排水采气技术

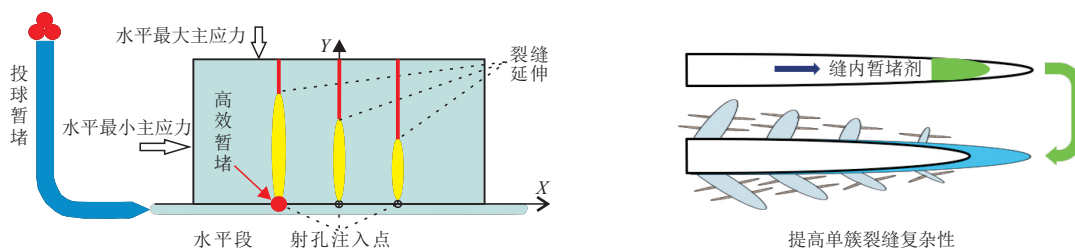


图8 组合暂堵工艺原理

Fig. 8 Principle of combined temporary plugging process

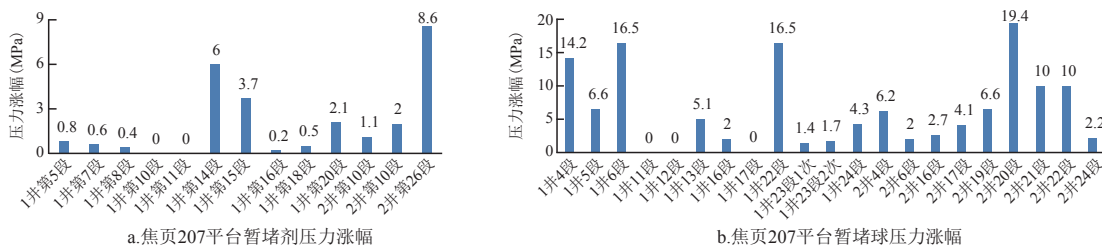


图9 焦页207平台暂堵施工压力涨幅柱状图

Fig. 9 Histogram of increase in temporary plugging construction pressure of platform JY207

研究还处在探索阶段。尤其是对于大多数常压页岩气井和排采中后期的页岩气井来说,排水采气技术尤其重要。

面对东胜、平桥南斜坡、武隆、彭水等常压区块的规模建产,需要人工举升的气井将越来越多,所以开展相应的生产规律研究、优化工艺管柱及配套工艺、研制关键工具,形成可靠、适用的排水采气技术迫在眉睫。

### 2.3.1 单管射流泵排水采气工艺

单管射流泵是一种特殊的水力泵<sup>[21]</sup>,它在井下工作时没有运动件,主要由井下部分、地面部分和井口组成,该泵首次在页岩气井中应用,其井下单管射流泵工作原理为:高压动力液在油管的泵芯中以一定流量通过喷嘴高速射出,使喷嘴周围的压力下降,地层液体由单向阀进入吸入室内,两股液体在喉管中

充分混合后进入扩散管,经泵芯出口进入环空从而被举升到地面(图12)。

通过前期调研,在工区的常压和高压区块分别优选一口单井进行矿场试验:常压区块PY3HF井,关井前产气量低,积液严重,不能自喷生产;高压区块JY195-2HF井处于生产后期,地层能量下降,产气量低,地层积液严重,生产波动大,处于停喷边缘。针对页岩气产液量大的特点,优化地面流程,增加分离罐,通过溢流口自动计量液量装置(图12)。

1) PY3HF井:2019年1月22日该井进行单管射流泵试验,恢复生产后,产气量由 $0.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 上升至 $0.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,日产水量 $20.7 \text{ m}^3$ ,2020年4月检泵后一直稳定生产至今,生产曲线见图13。

2) JY195-2HF井:为实现连续、稳定生产,该井下入单管射流泵排采。初期射流泵试验产气量由 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 上升至 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,之后产量持续下降至

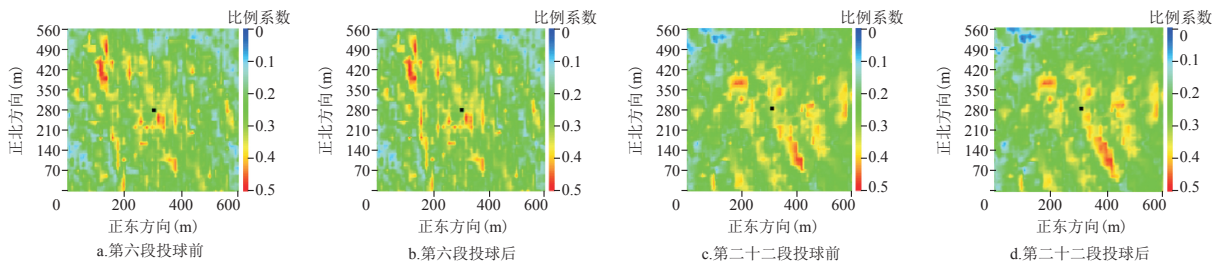


图10 焦页207-1HF井第6段、22段投球前后微地震对比

Fig. 10 Comparison of microseisms before and after pitching in section 6 and section 22 of Well-JY207-1HF

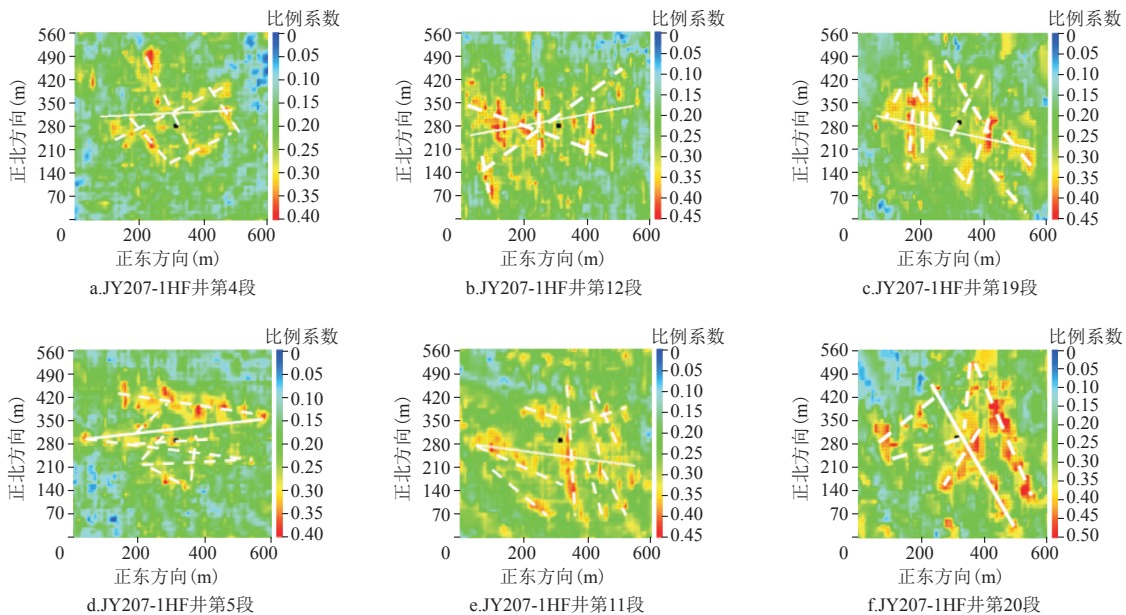


图11 焦页207-1HF井各段微地震对比

Fig. 11 Comparison of microseisms in various sections of Well-JY207-1HF

3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,不能稳产,处理泵芯后产量大幅度下降至2.3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,基本不产液。运行一个月后由于地层出砂导致射流泵泵堵暂停试验,生产曲线见图14。

目前该工艺在工区实施7井次,实现了4口井的增产,2口井为直接投产,1口井为停喷转射流泵,累计已增产313×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>(表4)。

单管射流泵排采工艺能实现气井的连续稳定生产,并能提高气井产量,基本适用于中浅层页岩气井的排水采气。

### 2.3.2 “皮带机+管式泵”排采工艺

借鉴于常规采油及煤层气排采<sup>[22]</sup>的经验,成功的开展了页岩气井机抽排采工艺试验。

机抽排水采气工艺的基本原理与机抽采油类

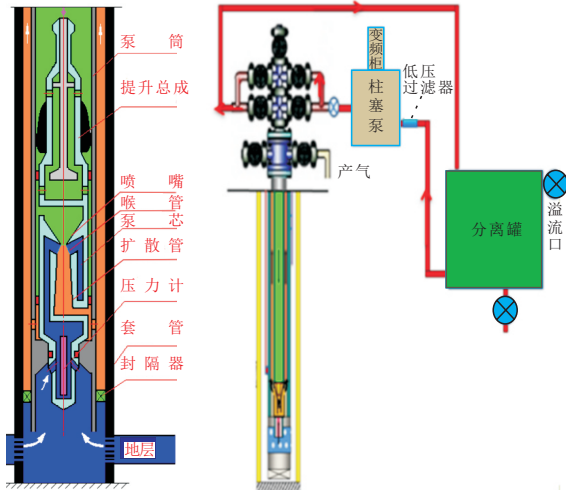


图12 射流泵工艺原理及地面流程、井口示意图

Fig. 12 Schematic diagram of jet pump process principle, ground process and wellhead

似,利用抽油机、抽油杆等抽油设备将电能转化为抽油杆的上下往复运动的机械能,通过活塞运动抽水出井,实现油管采水,套管采气。

该工艺于2019年首次在LY2HF井上开展应用。该井是一口常压页岩气井,压后无法自喷生产。前期电潜泵排采,因液量与排量不匹配,变频柜时常故障而导致停抽,不能连续生产,停抽前日产液10 m<sup>3</sup>,日产气2.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

该井采用提高泵效的液气混抽泵<sup>[23]</sup>、井下气水分离器解决气锁现象;易偏磨井段采用加重杆、防偏磨接箍、扶正器、内衬油管作防偏磨处理;利用皮带式抽油机<sup>[24]</sup>“长冲程、低冲次”的生产制度进一步降低管

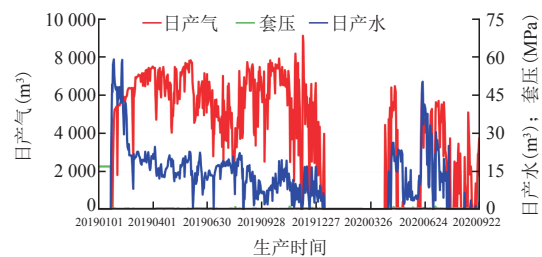


图13 PY3HF井生产曲线

Fig. 13 Production curve of Well-PY3HF

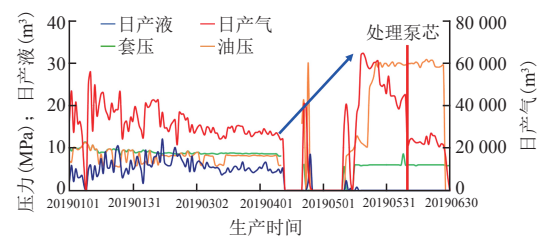


图14 JY195-2HF井生产曲线

Fig. 14 Production curve of Well-JY195-2HF

表4 南川气田射流泵生产情况

Table 4 Production situation of jet pump in Nanchuan Gas Field

序号	井号	平均日产气(m <sup>3</sup> )		平均日产水(m <sup>3</sup> )		日均增产(m <sup>3</sup> )	累计增产(m <sup>3</sup> )	备注
		措施前	措施后	措施前	措施后			
1	PY3HF	1 000	4 974	1	14	3 974	2 006 870	
2	PY4HF	8 489	11 078	9.28	14.4	2 589	59 547	
3	PY5HF	4 402	5 490	9.2	55.4	1 088	68 544	
4	SY3HF	0	13 575	0	76			产能下降,难以自喷生产后上射流泵复产
5	LY3HF		10 472		110			直接射流泵投产
6	PD1HF		8 600		38.1			直接射流泵投产
7	JY211-4HF	15 731	20 929	8.25	74.1	5 198	1 003 214	
合计							3 138 175	

杆偏磨;采用可调式防喷盒和光杆密封器治理井口气体密封的问题。

2019年5月11日启抽生产,截至2020年1月28日,日产气稳定在 $2.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日产液 $5.2 \text{ m}^3$ ,实现了气井的连续稳产,目前正在摸索间抽制度。

“皮带机+管式泵”排采工艺装备简单、可靠,能自动控制,可实现有人管理,无人操作;设计简单、成熟;可使设备多井运移;工艺井不受采出程度影响,并能把气水井采至枯竭。

### 3 发展建议

随着常压页岩气大规模高效勘探开发的持续推进,对钻完井、压裂、采气工艺技术提出了更高的要求。升级钻井设备、工具,攻关浅表层复杂段技术,研究超长水平段关键技术;提高压裂工艺的自动化、智能化程度,降低压裂工具的成本并提高其可靠性,改善储层改造效果;形成稳定可靠且经济适用的排水采气工艺序列,从而实现常压页岩气钻完井、压裂施工的提速提效,采气工艺技术的完善,最终推进常压页岩气的持续高效开发。

#### 3.1 钻完井技术

##### 3.1.1 钻井设备、工具升级配套

围绕“四提”工作要求,落实工具、设备配套升级,继续实施激进参数钻井,形成更加完善的优快钻井推荐做法,实现钻完井工程全方位提速降本,推动常压、低压页岩气区块效益开发。

##### 3.1.2 浅表层复杂井段技术攻关

开展东胜北浅表层复杂技术攻关,试验泡沫水泥固结井壁、套管钻井等主动堵漏穿漏技术,实现东胜背斜的全面开发。

##### 3.1.3 超长水平井关键技术研究

开展水平段3 000 m以上超长水平井<sup>[25]</sup>钻完井关键技术研究<sup>[26]</sup>,优选二维或小三维井先行试验,通过设备工具配套、轨迹高效控制技术<sup>[27]</sup>、井眼清洁技术<sup>[28]</sup>、旋转下套管技术<sup>[29]</sup>、漂浮接箍<sup>[30]</sup>应用等技术集成,实现水平段长突破,提高单井控制储量和可采数量,降低钻完井综合成本。

#### 3.2 压裂技术

##### 3.2.1 持续推进全电静音压裂工艺技术。

全电静音压裂工艺施工噪音低、污染小、节约成本和用地、自动化程度高,能减小施工强度及风险、实现精准集中控制和远程操作,提高施工效率。但目前该工艺的自动化尚未完全升级,智能化程度也较低。下一步可持续自动化升级、智能化改造,进一步提速提效。通过集控网络改造与通讯测试,实现自动压裂设备集成控制,将控制系统全部接入指挥控制中心内,操作人员进行远程控制,加强人员协作,提高工作效率,减少反应时间,提高控制精度,形成一套适合页岩气绿色高效开发的电动压裂自动化成套方案。

##### 3.2.2 加快一体化滑套完井压裂工艺国产化进程

一体化滑套完井压裂工艺简化了压裂工序,取消了通探洗、射孔、泵送等环节,实现了提速降本。但目前趾端滑套和无限级滑套的费用偏高,工区趾端滑套的整体开启成功率低于95%,无限级滑套还严重依赖外国进口。下一步建议加强滑套的国产化推进工作,降本的同时推进国内技术进步,摆脱国外产品、技术的诸多限制。

##### 3.2.3 组合暂堵转向工艺优化

组合暂堵转向工艺改善了压裂效果,实现了压后产量的提升。但暂堵剂费用较高,暂堵效果的影响因素尚未明确。可进一步开展暂堵剂的性能优化及降本研究,并进一步优化压裂段数和暂堵剂用量,更好地降本增效,实现页岩气的可持续开发。

#### 3.3 排水采气技术

经过理论研究及现场试验,成功地形成了两种适用于常压页岩气的排采工艺。但射流泵的低泵效及地面柱塞泵的承压限制(35 MPa)决定了管柱深度不能超过2 600 m,该工艺对深层页岩气井有一定的限制;页岩气井高矿化度的产液,导致井下管柱结垢严重影响泵正常工作。机抽排采的下泵深度受限制、井口密封效果不佳、抽油杆和泵易损坏、泵效低等问题尚未完全解决。

下一步建议对该两种工艺进行优化改进,解决

管柱结垢、下泵深度及排量受限制等问题,延长检泵周期、提升排采效率和安全性能,同时引进新工艺试验,完善排采工艺技术序列。

## 4 结论

1) 针对南川常压页岩气田开发的技术难点,研发形成了以“工具设备配套激进参数、滑套配合全电压裂、多种适用人工举升”为核心的钻完井、压裂及排水采气技术系列,实现了南川页岩气田的高效开发。

2) 该技术系列有效地支撑了平桥南、东胜、JY10、武隆、彭水等区块的高效开发。减少钻井周期14.5%,单井测试产量由平均 $9.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提高至 $19.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,实现了钻试工程一体化,单井减少压裂准备周期5 d、节约费用43万元,单井压裂效率由每天2.5段提升至常压页岩气最高施工纪录每天8段;实现了低压、常压气井的连续稳定生产并增产气 $313 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3) 该技术系列实现了气田高效开发,但在钻完井技术上地面泥浆泵功率不足,需升级设备配套,加强激进参数下的轨迹控制措施;压裂技术上需继续优化滑套,并促进国产化降本;排水采气技术上还需克服管柱结垢、泵挂深度和排量受限制等问题。

4) 目前我国页岩气规模开发主要集中于川渝地区,南川页岩气田形成的高效开发技术体系及其应用实践,对我国其他区块页岩气高效开发具有良好的示范效果和推广应用价值。

### 参考文献

- [1] 江凯禧,彭丽,何文祥,等.页岩气储层非均质性研究——以四川盆地寒武统筇竹寺组为例[J].海洋地质前言,2014,30(8):47-54.  
Jiang Kaixi, Peng Li, HE Wenxiang, et al. Research of shale gas reservoir heterogeneity: A case of the lower Cambrian Qiongzhusi Formation Of The Sichuan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(8): 47-54.
- [2] 张奥博,汤达祯,陶树,等.中美典型含油气页岩地质特征及开发现状[J].油气地质与采收率,2019,26(1):37-45.  
ZHANG Aobo, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Analysis of geological background and development situation of typical oil/gas-bearing shales in China and America[J]. Petroleum Geology and Efficiency, 2019, 26(1): 37-45.
- [3] 赵荣华,李斌,万爱娥.复合桥塞在水平井分段压裂中的应用[J].江汉石油职工大学学报,2012,25(5):53-55.  
ZHAO Ronghua, LI bin, WAN Ai'e. On application of composite bridge plug in staged fracturing of horizontal wells[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2012, 25(5): 53-55.
- [4] 文小娟,曹红海,卢可佳,等.连续油管技术在页岩气水平井射孔与钻塞中的应用[J].江汉石油职工大学学报,2015,28(6):36-38.  
WEN Xiaojuan, CAO Honghai, LU Kejia, et al. Application of coiled tubing technology in shale gas horizontal-well perforation and drilling plug[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(6): 36-38.
- [5] 何希鹏,张培先,房大志,等.渝东南彭水—武隆地区常压页岩气生产特征[J].油气地质与采收率,2018,25(5):72-79.  
HE Xipeng, ZHANG Peixian, FANG Dazhi, et al. Production characteristics of normal pressure shale gas in Pengshui-Wulong area, southeast Chongqing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 72-79.
- [6] 夏海帮,袁航,岑涛.彭水区块页岩气生产井排采方式研究与应用[J].石油钻探技术,2014,42(4):21-26.  
XIA Haibang, YUAN Hang, CEN Tao. Study and application of drainage methods for shale gas wells in Pengshui Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 21-26.
- [7] 路保平,丁士东.中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J].石油钻探技术,2018,46(1):1-9.  
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-9.
- [8] 刘茂森,付建红,白璟.页岩气双二维水平井轨迹优化设计与应用[J].特种油气藏,2016,23(2):147-150.  
Liu Maosen, FU Jianhong, BAI Jing. Optimization of shale gas dual-2D horizontal-well trajectories and its application[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 147-150.
- [9] 刘克强.“一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J].石油机械,2019,47(11):13-18.  
LIU Keqiang. Technology status and development prospect of the key tools of one-trip drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(11): 13-18.
- [10] 张敏.川东南泰来区块202井优快钻井技术[J].石油地质与工程,2020,34(3):89-91.  
ZHANG Min. Excellent and fast drilling technology in well-202 of Tailai block in southeast Sichuan[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(3): 89-91.
- [11] 伍葳,曹权,李斌,等.长宁气田水平段钻井参数强化必要性浅析[J].非常规油气,2019,6(4):94-98.  
WU Wei, CAO Quan, LI Bin, et al. The necessity analysis of drilling parameter optimizing in the horizontal section of shale gas wells in Changning area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 94-98.
- [12] 张永强,曲从锋,卞维坤,等.昭通页岩气示范区水平井生产套管固井技术[J].钻采工艺,2019,42(5):31-34.  
ZHANG Yongqiang, QU Congfeng, BIAN Weikun, et al. Production casing cementing in horizontal wells at zhaotong shale gas development demonstration zone[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(5): 31-34.
- [13] 周成香,吴壮坤,丁桥.电动压裂泵在页岩气井压裂中的先导试验[J].石油机械,2018,46(11):104-108.  
ZHOU Chengxiang, WU Zhuangkun, DING Qiao. Pilot test of electric fracturing pump in shale gas well[J]. China Petroleum

- Machinery, 2018, 46(11): 104-108.
- [14] 朱玉杰,刘晓平,魏辽.水平井延时启动趾端滑套关键技术研究[J].钻采工艺,2019,42(3):80-84.  
ZHU Yujie, LIU Xiaoping, WEI Liao. Research on key technology of time-delayed activation of toe sleeve in horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(3): 80-84.
- [15] WELLHOEFER B, CANNING S, ALKEK T, et al. New toe sleeve enables true casing-pressure test in an eagle ford shale well: A case study[C]// Paper SPE-176876-MS presented at the SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition, November 9-11, 2015, Brisbane, Australia.
- [16] 曾凌翔.一种页岩气水平井均匀压裂改造工艺技术的应用与分析[J].天然气勘探与开发,2018,41(3):95-101.  
ZENG Lingxiang. Uniform fracturing technologies and their application to shale-gas horizontal wells[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(3): 95-101.
- [17] BOWKER K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [18] 何火华,黄伟,王鹏.水平井前置酸加砂压裂技术优化研究[J].非常规油气,2020,7(2):109-113.  
HE Huohua, HUANG Wei, WANG Peng. Research on optimization of pre-acid sand fracturing technology for horizontal wells[J]. Unconventional Oil and Gas, 2020, 7(2): 109-113.
- [19] MOHAGHEGH S D. Reservoir modeling of shale formations[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2013, 12: 22-33.
- [20] 夏海帮.页岩气井双暂堵压裂技术研究与现场试验[J].石油钻探技术,2020,48(3):90-96.  
XIA Haibang. The research and field testing of dual temporary plugging fracturing technology for shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 90-96.
- [21] 张霖,李学康,刘伟,等.水力射流泵排水采气工艺技术及应用[J].钻采工艺,2005,28(4):74-75.  
ZHANG Lin, LI Xuekang, LIU Wei, et al. Application of water-jet pump drainage gas recovery technology[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(4): 74-75.
- [22] 陈凤官,綦耀光,王渭,等.煤层气井水力射流泵排采的适应性研究[J].石油和化工设备,2012,15(4):8-10.  
CHEN Fengguan, QI Yaoguang, WANG Wei. Adaptability of water-jet pump for drainage of coalbed methane wells[J]. Petro & Chemical Equipment, 2012, 15(4): 8-10.
- [23] 赵辉,杨峰,王海文,等.液气混抽泵强制排气增产技术研究[J].石油矿场机械,2013,42(2):4-8.  
ZHAO Hui, YANG Feng, WANG Haiwen, et al. Mechanism of enhanced production by enforcing gas evacuation of multiphase pump[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(2): 4-8.
- [24] 杨阳,于继飞,曹砚锋,等.皮带抽油机在海外X区块油砂开采中的应用研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2019,21(6):59-61.  
YANG Yang, YU Jifei, CAO Yanfeng, et al. Application research of belt pumping unit in oil sand producing in X Block [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2019, 21(6): 59-61.
- [25] 代瑜,范忠波,谢荣华,等.四川长宁页岩气超长水平井钻井技术的应用[J].化工设计通讯,2019,45(7):267-268.  
DAI Yu, FAN Zhongbo, XIE Ronghua, et al. Application of drilling technology in Changning Shale Gas super long horizontal well in Sichuan[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(7): 267-268.
- [26] 杨海平,游云武.焦页2-5HF长水平井钻完井关键技术[J].钻采工艺,2018,41(3):5-8.  
YANG Haiping, YOU Yunwu. Critical drilling technology for drilling super-long horizontal well JY 2-5HF[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 5-8.
- [27] 宋争.涪陵江东与平桥区块页岩气水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻探技术,2017,45(6):14-18.  
SONG Zheng. Wellbore trajectory control techniques for horizontal well in the Jiangdong and Pingqiao Blocks of the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 14-18.
- [28] 石磊,孙帅帅,王翊民.大位移井井眼清洁技术简析[J].石油和化工设备,2019,22(8):71-72.  
WANG Lei, SUN Shuaishuai, WANG Yimin. Brief introduction of hole cleaning technology of extended reach wells[J]. Petro & Chemical Equipment, 2019, 22(8): 71-72.
- [29] 张兰江.Tesco旋转套管固井工艺和应用评价[J].石油矿场机械,2018,47(2):59-62.  
ZHANG Lanjiang. Tesco's technology of rotating casing while cementing and application evaluation[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(2): 59-62.
- [30] 陈保山,程智远,徐敏,等.新型 $\phi 139.7$  mm 漂浮接箍的研制与应用[J].石油机械,2016,44(11):29-32.  
CHEN Baoshan, CHENG Zhiyuan, XU Min, et al. The development and application of novel  $\phi 139.7$  mm casing floating tool[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(11): 29-32.

(编辑 尹淑容)