

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201603002

涪陵页岩气田“井工厂”技术

张金成¹, 艾 军², 臧艳彬¹, 杨海平³, 陈小锋¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408014; 3. 中石化江汉石油工程有限公司钻井一公司, 湖北潜江 433123)

摘 要:涪陵页岩气田是我国第一个投入商业化开发的国家级页岩气示范区, 经过3年的技术攻关和现场试验及应用, 形成了一套适合复杂山地页岩气特点的“井工厂”技术, 极大地缩短了开发周期, 降低了工程成本。涪陵页岩气田“井工厂”关键技术主要包括山地“井工厂”布局优化设计、页岩气“井工厂”钻井作业模式、“井工厂”压裂作业模式以及撬装化建站等4个方面。现场试验与推广应用情况表明, 采用单钻机2~4井和双钻机5~8井“井工厂”钻井模式, 单机组拉链式“井工厂”压裂与双机组同步“井工厂”压裂模式, 可以达到当年完成建平台、钻井、压裂、试气、投产的开发要求。“井工厂”技术为涪陵页岩气田 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 一期产能建设的顺利完成提供了强有力的技术支撑, 并成为页岩气田经济开发的核心技术, 对我国页岩气规模化开发具有重要的借鉴和引领作用。

关键词:页岩气; “井工厂”技术; 钻井; 压裂; 撬装化; 涪陵页岩气田

中图分类号: TE249; TE371 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)03-0009-07

Multi-Well Pad Technology in the Fuling Shale Gas Field

ZHANG Jincheng¹, AI Jun², ZANG Yanbin¹, YANG Haiping³, CHEN Xiaofeng¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Company, Chongqing, 408014, China; 3. No.1 Drilling Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Qianjiang, Hubei, 433123, China)

Abstract: The Fuling Shale Gas Field is the first commercial development of shale gas in China and thus is now a national demonstration area. After three years of research and development, the Gas Field had developed “multi-well pad” technologies to cope with requirements presented by shale gas developed in complex mountain areas. These technologies could significantly reduce the time and costs required for the development of shale gas. This paper reviews key “multi-well pad” technologies developed in the Fuling Shale Gas Field from four aspects: first, optimized deployment and design of well patterns, second, drilling operations in the “multi-well pad” system for shale gas development, third, fracturing operations in the “multi-well pad” system for shale gas development and fourth, construction or skid-mounted stations. Field tests and application performances showed that the combination of “multi-well pad” drilling operations involving a single rig for 2–4 wells or two rigs for 5–8 wells with zipper fracturing with one fracturing unit or synchronous fracturing with two fracturing units could fully satisfy development demands related to accomplish of platform construction, drilling, fracturing, well testing and commercial production within the same year. In addition to providing construction of $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ productivity in Phase 1 development of the Fuling Shale Gas Field with reliable technical supports, the “multi-well pad” system has become the core technology for economic development of shale gas fields. In fact, these technologies might provide necessary guidance for large-scale development of shale gas in China.

Key words: shale gas; multi-well pad; drilling; fracturing; skid-mounted; Fuling Shale Gas Field

目前,我国非常规油气资源的勘探开发存在配套设备仪器利用率低、施工周期长、工程成本过高等问题,严重制约了非常规油气资源的勘探开发进程。在北美地区非常规油气尤其是页岩气勘探开发过程中,纳米孔喉系统“连续型”油气聚集地质理论、水平井体积压裂“人造渗透率”技术和多井平台式“井工厂”低成本开发模式等3大核心技术得到了大规模应用,取得了巨大的经济效益^[1-2]。2009年以来,我

国先后在苏里格南合作区和大牛地气田、胜利东辛

收稿日期:2015-12-25;改回日期:2016-03-07。

作者简介:张金成(1963—),男,河南社旗人,1985年毕业于华东石油学院钻井工程专业,1988年获石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位,2007年获中国科学院力学研究所工程力学专业博士学位,教授级高级工程师,主要从事深井超深井钻井提速技术、页岩气钻井技术与钻井工程设计方面的研究工作。E-mail: zhangjc.sripe@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)部分研究内容。

油田盐 227 区块、延川南煤层气区块等进行了“井工厂”钻完井技术的积极探索和应用^[3-6],并取得了很多认识和收获,但与国外相比,我国“井工厂”钻完井技术仍处于起步阶段,还存在着许多不足,主要体现在^[7]:1)钻机移动装置及配套设备还不能达到快速搬迁与安装的需求,如大牛地气田 DP43-H 丛式水平井组 3 台钻机虽然采用了滑轨式移动装置,但由于配套设备未能实现快速拆卸与安装,平均搬迁与安装周期依然长达 5.25 d;2)在井眼轨道设计方面,考虑到降低长水平段水平井钻井施工作业难度,水平段呈非平行布置,即水平井井眼轨道未沿着最小主应力方向,而是与之有一定夹角;3)没有实现“依次一开、依次二开和依次三开”的流水线作业模式;4)还没有形成钻井、压裂与建站紧密结合的一体化“井工厂”技术。

2013 年初,中国石化开始进行页岩气“井工厂”技术攻关研究,取得了丰硕的研究成果,并在涪陵页岩气田进行了规模化应用。笔者从山地“井工厂”布局优化设计、“井工厂”钻井和压裂作业模式、撬装化建站技术和现场试验与应用等方面对涪陵页岩气田“井工厂”关键技术进行总结与分析,以期为其他页岩气区块实施和应用“井工厂”技术提供借鉴与参考。

1 山地“井工厂”布局优化设计技术

涪陵页岩气田地处四川盆地边缘,深藏于武陵山系的崇山峻岭之中,海拔 200~2 000 m,可利用的土地资源十分有限,不适合单井开发,考虑采用“井工厂”模式开发^[8]。“井工厂”布局优化需要考虑工程和环境的影响,重点需要注意以下几点^[9-12]:1)充分利用自然环境、地理地形条件,尽量减小钻前工程的难度,同时使占地面积最小化;2)考虑钻井工程难度和井眼轨迹控制能力,使水平段长度最大化;3)尽量提高水平段页岩气储层钻遇率,实现储量资源动用最大化;4)满足产能建设开发方案和页岩气集输建设要求,实现当年建设当年投产的目标。

1.1 正反向对称式井眼轨道设计方案

基于最大程度实现“井工厂”重复作业的基本原则,提出了正反向对称式井眼轨道设计方案,如图 1 所示。

图 1(a)为 4 井平台正反向对称式井眼轨道设计,正反向各 2 口井,水平段长 1 500 m,靶前距 800 m,水

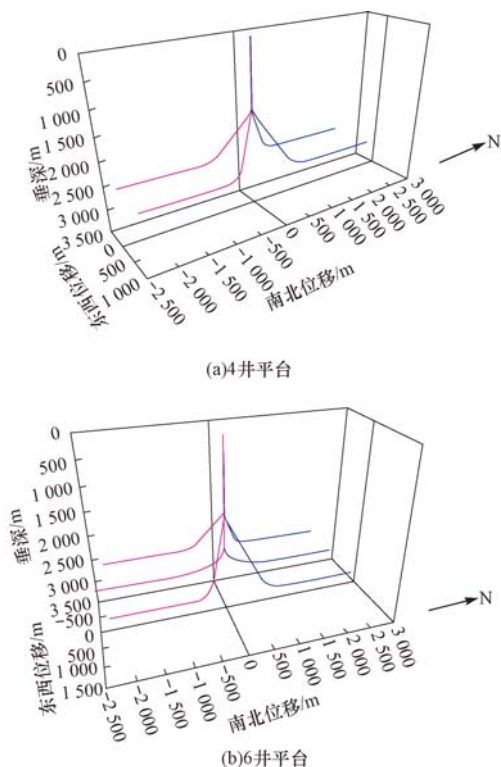


图 1 正反向对称式井眼轨道设计示意

Fig. 1 The schematic diagram of reverse symmetrical well trajectory

平段间距 600 m,偏移距 300 m,均为三维井眼轨道水平井,钻井难度相同;图 1(b)为 6 井平台正反向对称式井眼轨道,正反向各 3 口井,中间 2 口井设计为二维井眼轨道,其余 4 口井设计为三维井眼轨道,偏移距 600 m,钻井难度相同。

涪陵地区焦石坝区块“井工厂”平台的井眼轨道设计以三维井眼轨道为主,少数井为二维井眼轨道,具有 3 大特点^[4-7]:1)大偏移距,6 井平台偏移距为 600 m,4 井平台偏移距为 300 m;2)大靶前距,靶前位移为 800 m;3)长水平段,水平段长度为 1 500 m。

1.2 交叉式全覆盖布井方案

基于最大程度动用页岩气储量资源的基本原则,根据当前我国水平井钻井能力,创造性地提出了交叉式全覆盖布井方案,如图 2 所示(其中,红色正方形代表“井工厂”平台,红色直线代表该平台的水平井水平段的布置情况;蓝色正方形代表相邻的“井工厂”平台及其水平井水平段的布置情况)。

图 2(a)为 4 井平台交叉式布井方案,1 个平台 4 口井,正向和反向各 2 口井,相邻 2 个平台交叉布井,一个平台正向和反向 2 口水平井的着陆点之间的储层(即 2 口井入靶点之间的储层段,一般为靶前

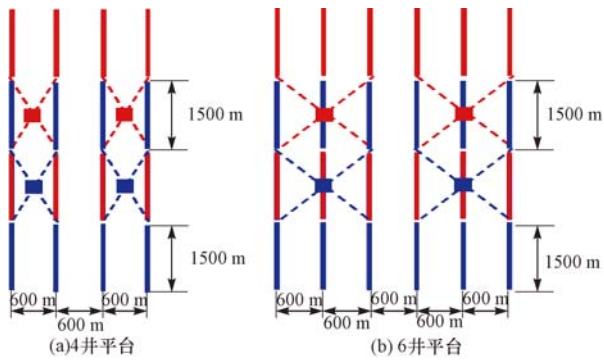


图 2 交叉式全覆盖布井方案示意

Fig. 2 The schematic diagram of full coverage and cross-well program

距的 2 倍,即 1 600 m)被另一平台 1 口井的水平段(水平段长为 1 500 m)完全覆盖,不会造成储量损失,实现了储层资源动用最大化。图 2(b)为 6 井平台交叉式布井方案,1 个平台 6 口井,正反方向各 3 口井,相邻 2 个平台交叉布井。

涪陵焦石坝区块一期产能建设区以 4 井平台和 6 井平台为主,考虑构造边部及特殊情况等因素,共需建 63 个钻井平台钻 253 口水平井,水平段可以全部覆盖一期产能建设区的储层。

1.3 经济优化型“井工厂”平台布局方案

基于“当年建平台,当年建产能”的目标,针对钻机不同运移方式及涪陵页岩气井建井周期等实际情况,提出了经济优化型“井工厂”平台布局方案^[13]: 1)2~4 井平台采用单钻机,分单排和双排布井,井间距为 10 m,排距为 12 m;2)5~8 井平台采用双钻机,双排布井,井间距为 10 m,排距为 50 m。

表 1 钻机运移方式适应性分析

Table 1 Analysis of rig relocation adaptability

移动方式	移动方向	移动速度/(m·min ⁻¹)	地基强度/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

对比分析可知,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享,在涪陵地区的适用性较好。

在此基础上,对钻机及配套设备的运移方案进行了优化:1)通过钻机移动装置实现井架和钻台(包括钻台上的钻具及设施)整体移动,循环系统、钻井泵、发电房不移动;2)在井架底座配置一部额定起重量为 250 kN 的导轨滑车,把防喷器组作为一个整

建立了“井工厂”模式经济评价模型,对“井工厂”平台不同布井数量条件下的单井平均工程费用进行了计算,结果如图 3 所示。

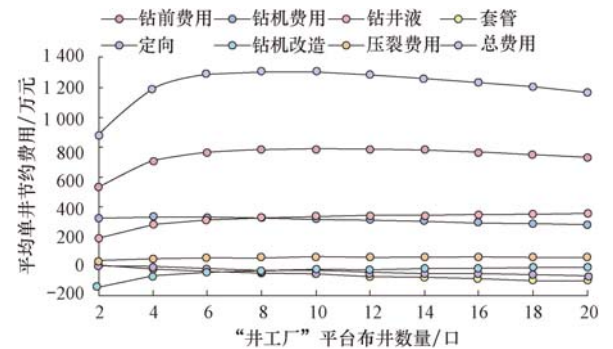


图 3 “井工厂”模式经济评价结果

Fig. 3 The economy evaluation results by multi-well pad model

由图 3 可知:随着平台井数增加,单井平均工程费用大幅降低;当平台井数达到 6 口井时,单井平均工程费用的降低值达到最大;当超过 12 口井后,随着井数增加,单井平均工程费用的降低值逐渐减小。因此,“井工厂”模式下经济最优平台井数为 4~8 口。

2 山地“井工厂”钻井技术

2.1 钻机快速移动装置及配套设备优化配置

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,优选出了适用于涪陵山地条件的“井工厂”钻机运移方式,并进行了对比分析,结果见表 1。

体吊起,随钻机一起移动;3)配备标准长度的井控管汇和钻井液管汇,实现地面管汇的快拆快接;4)配备集成化液气控制系统模块,实现钻台电气设备及装置控制系统的快速连接。截至 2015 年 9 月底,涪陵地区共配套了 12 部能够实现快速移动的钻机,其中滑轨式 10 部、轮轨式 1 部、步进式 1 部。

通过钻机快速移动装置及相关设备的配套与改造,实现了钻机的快速运移,具体指标为:滑轨式移动方式下,移动 10 m 所需时间 1.5 h,从准备到开钻

所需时间小于 24 h;轮轨式移动方式下,移动 10 m 所需时间 1.0 h,从准备到开钻所需时间小于 24 h;步进式移动方式下,移动 10 m 所需时间 2.0 h,从准备到开钻所需时间小于 24 h。

2.2 流水线式“井工厂”钻井作业流程

基于实现“井工厂”流水线作业的理念,把井筒尺寸相同(开次相同)和钻井液相同或相近的井段作为“井工厂”钻井作业流程划分的主要原则,提出了“依次一开,依次二开,依次三开”的“井工厂”钻井作业流程,并以 4 井平台三开井身结构井为例,对“井工厂”钻井作业流程进行介绍。

2.2.1 第 1 个作业流程

把导管与一开钻井作为一个单元,通过快速移动钻机,依次完成第 1 口井至第 4 口井的该单元作业。

第 1 口井:1)立井架、调试钻机设备;2)开孔钻进;3)下导管、固井、装防喷器、试压、一开准备;4)一开钻进;5)下表层套管、固井;6)移钻机至下一口井。第 2、第 3 和第 4 口井重复第 1 口井的步骤 2)~6),同时利用离线作业时间,安装上口井的一级套管头。第 4 口井安装完一级套管头后,转入第 2 个作业流程。

2.2.2 第 2 个作业流程

把二开钻井作为一个单元,通过快速移动钻机,依次完成第 4 口井至第 1 口井的该单元作业。

第 4 口井:1)组装二开井口防喷器组、连接井控管汇;2)连接井控装置、试压;3)下钻探塞、钻塞;4)二开直井段钻进;5)定向造斜钻进;6)通井、电测;7)下入技术套管、固井;8)移钻机至下一口井。在钻进二开直井段期间,利用离线作业时间配置水基钻井液。第 3、第 2 和第 1 口井重复步骤 2)~8),利用离线作业时间,安装上口井的二级套管头。第 1 口井安装完二级套管头后,转入第 3 个作业流程。

2.2.3 第 3 个作业流程

把三开钻井作为一个单元,通过快速移动钻机,依次完成第 1 口井至第 4 口井的该单元作业。

第 1 口井:1)配置油基钻井液;2)连接井控装置、试压;3)下钻探塞、钻塞;4)三开定向造斜钻进;5)钻进水平段;6)通井、电测;7)下生产套管、固井;8)移钻机至下一口井。第 2、第 3 和第 4 口井重复

步骤 2)~8),利用离线作业时间,安装上一口井的油管头。第 4 口井安装完油管头后,转入第 4 个作业流程。

2.2.4 第 4 个作业流程

把完井作业与试气准备作为一个单元,通过快速移动钻机,依次完成第 4 口井至第 1 口井的该单元作业。

第 4 口井:1)安装井控装置、试压;2)接小钻具;3)下钻探塞、扫塞;4)刮壁;5)通径、替射孔液;6)测固井质量、套管试压;7)移钻机至下一口井。第 3、第 2 和第 1 口井重复步骤 1)~7),利用离线作业时间,安装上口井的盖板法兰。第 1 口井安装完盖板法兰后,甩钻具、拆井架准备搬迁。

2.3 钻井液的重复利用

根据涪陵地区焦石坝区块的地质特点和水平井安全钻井的要求,每口井从上到下采用了无固相清洁钻井液(清水)、KCl 润滑钻井液和油基钻井液。采用“井工厂”钻井作业模式,每个流程一次性钻完平台上相同开次的所有井,可以实现同开次钻井液的重复利用,整个平台只有其中 1 口井进行钻井液配置和不同钻井液转换过程,其他井避免了不同钻井液转换所造成的浪费及占用的时间^[8,13]。以油基钻井液为例,井深 4 500 m 的井,第 1 口井油基钻井液总用量为 410 m³(包括井筒油基钻井液量 190 m³、地面循环量 120 m³、钻井液补充量 100 m³),采用“井工厂”钻井作业模式,第 2、第 3 和第 4 口井,只需新增每口井消耗的油基钻井液用量 100 m³,不用清理钻井液罐;而采用丛式井作业模式,第 2、第 3 和第 4 口井可回收利用油基钻井液量按照地面循环量的 80%+井筒油基钻井液量的 60%计算,可回收利用第 1 口井的油基钻井液量为 210 m³(120 m³×80%+190 m³×60%),则每口井需要补充 200 m³ 油基钻井液,同时还要不同钻井液转换,占用大量的钻井时间。

2.4 “井工厂”钻井技术的应用效果

涪陵页岩气田在焦石坝区块 300[#]、50[#]、15[#]、31[#]、46[#] 等平台开展了不同井数(2、3、4、5、6、7 和 8 口井)、不同移动方式(步进式、轮轨式和滑轨式)的“井工厂”钻井技术现场试验与推广应用。截至 2015 年底,共在 18 个平台完钻 71 口井。其中,2 井平台 5 个,4 井平台 4 个,3 井平台和 5 井平台各 3

个,6 井、7 井和 8 井平台各 1 个,已投产 6 个平台 22 口井。焦页 30[#] 平台是在焦石坝区块布置的第 1 个“井工厂”试验平台,共布置 4 口井,成单排排列,井口间距 10 m,采用一台轮轨式横向移动的 50 型钻机,完钻井深分别为 4 506,4 188,4 238 和 4 055 m。整个平台 4 口井的钻井作业仅用时 118 d,平均建井周期 53.7 d,比同期井缩短 28.1 d,缩短了 34.35%;平均搬迁安装周期 3.16 d,比同期井缩短 5.03 d,同比缩短了 61.42%;平均中完作业时间 6.10 d,比同期井缩短 7.61 d,同比缩短了 55.51%;平均使用油基钻井液 240 m³,比同期井减少 170 m³,同比减少了 41.46%。

3 “井工厂”压裂技术

页岩气压裂施工作业的特点为“四多一长”,即压裂设备多、液量多、砂量多、压裂段数多和施工时间长^[10]。为加快压裂试气施工进度,涪陵页岩气田研究形成了“井工厂”压裂作业模式,即在一个“井工厂”平台集中对多口井采用批量化流水线式连续压裂作业。

3.1 “井工厂”压裂作业模式

“井工厂”压裂作业模式主要有单套压裂机组拉链压裂模式和双套压裂机组同步压裂模式 2 种类型^[3],如图 4 所示。

表 2 单套压裂机组拉链压裂模式的设备配套

Table 2 Matching devices for the single-set equipment of zipper fracturing mode

压裂模式	压裂流程	压裂车数量/台	混砂车数量/台	混配车/台	仪表车/台	供酸撬/台	高低压管汇组合/套
单井压裂模式	主压裂与泵送桥塞使用同一套流程	14(总水功率 26 110.10 kW)	480 型 1 台或 360 型 2 台	1	1	1	2
	主压裂	16(水功率 30 959.0 kW ¹⁾)	480 型 1 台 备用 360 型 2 台	2(1 车 1 撬)	1	1	2
“井工厂”拉链压裂模式	泵送桥塞	3(水功率 5 147.4 kW)			1	1	1
	合计	19(总水功率 36 106.4 kW ²⁾)	3(双倍配备)	2(双倍配备)	2(双倍配备)	2(双倍配备)	3

注:1)是单井压裂模式下水功率的 1.19 倍;2)是单井压裂模式下水功率的 1.38 倍。

3.2.2 双套压裂机组同步压裂模式

双套压裂机组同步压裂模式的设备配套见表 3,共需使用 55 台套设备。

3.3 “井工厂”压裂技术的应用效果

涪陵页岩气田在 42 个平台应用了“井工厂”压

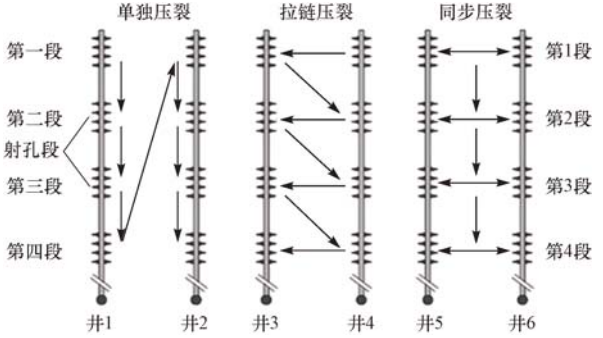


图 4 “井工厂”压裂作业模式示意

Fig. 4 The schematic diagram of fracturing operations involving multi-well pad

所谓拉链压裂就是使用 1 套压裂机组,在对 1 口井进行压裂作业的同时,对另 1 口配对井进行射孔、下桥塞等作业,2 口井交互施工、逐段压裂。

所谓同步压裂就是使用 2 套机组对 2 口或 2 口以上的配对井同时进行大规模压裂作业。同步压裂需要更多的协调工作、较大的作业场所和后勤保障,费用较高。

3.2 “井工厂”压裂作业设备配套

3.2.1 单套压裂机组拉链压裂模式

采用独立的“泵送桥塞—射孔联作”泵送流程,单独采用 2~3 台 2000 或 3000 型压裂车进行泵送施工,与主压裂流程不产生冲突,保证泵送过程的顺利进行。设备配套见表 2,共需使用 31 台套设备。

裂模式,共计 176 口井。其中,41 个平台采用了单机组拉链压裂作业模式,1 个平台采用了双机组同步压裂模式。首先在焦页 9[#] 平台相邻的焦页 9-1HF 井和焦页 9-3HF 井进行了单机组拉链压裂作业模式现场试验,共压裂 37 段,按照单井每天压裂 2 段计算,37 段的施工周期应为 18.5 d,采用“井工厂”拉链压裂,2 口井压裂作业仅用时 11.0 d,同

表 3 双套压裂机组同步压裂模式的设备配套

Table 3 Matching devices for the double-set equipment of synchronized fracturing mode

压裂模式	压裂流程	压裂车数量/台	混砂车数量/台	混配车/台	仪表车/台	供酸撬/台	高低压管汇组合/套
单井压裂模式	主压裂与泵送桥塞使用同一套流程	14(总水功率 26 110.0 kW)	480 型 1 台或 360 型 2 台	1	1	1	2
“井工厂”双机组同步压裂模式	主压裂	32(水功率 62 514.8 kW ¹⁾)	480 型 1 台 360 型 1 台 备用 360 型 1 台	4	2	2(备用 1 台)	2
	泵送桥塞	6(水功率 10 294.8 kW)			1(共用)	1	1
	合计	38(总水功率 72 809.6 kW ²⁾)	3	4	3	4	3

注:1)是单井压裂模式下水功率的 2.39 倍;2)是单井压裂模式下水功率的 2.79 倍。

比缩短了 41.67%,平均压裂 3.2 段/d,创造了连续 6 d 每天压裂 4 段的工程纪录,为涪陵页岩气田后续“井工厂”压裂施工积累了经验。拉链压裂施工统计结果表明,2 口井“井工厂”压裂模式比单井压裂模式平均单井施工周期缩短了 40.28%,设备转运费减少了 42.13%;4 口井“井工厂”压裂模式比单井压裂模式平均单井施工周期缩短了 56.60%,设备转运费减少了 40.10%;1 套压裂设备可以满足同平台 2~4 口井拉链压裂施工的需要,设备利用率得到了大幅度提高。

“井工厂”双机组同步压裂模式在焦页 42[#] 平台进行了首次试验,实现了 4 口井两两同步压裂,创造了国内页岩气单平台压裂机组最多(47 台套)、连续压裂施工段数最多(75 段)、总加砂量最多(4 306 m³)、总加液量最多(133 283 m³)、平均单井压裂周期最短(4.25 d)以及单日压裂施工段数最多(8 段)、单日加液量最多(12 965 m³)、单日加砂量最多(339 m³)等 8 项施工纪录。双机组同步压裂模式与单机组单井压裂模式相比,施工效率提高 50% 以上,压裂车辆减少 35%,试气周期缩短 75 d。

4 撬装化建站技术

集气站建设是“井工厂”平台的最后一道作业工序。在井场建立单井井口装置,开采出来的页岩气经井口节流降压后通过管道进入集气站,在集气站除砂、气液分离、增压和计量后进行外输。涪陵页岩气田开发初期集气站设备撬装化程度不高,集气站建设周期长,占地面积大,现场设备繁杂,难以满足涪陵页岩气田开发快完、快试和快投产的要求。因此,对“井工厂”平台集气站提出了井场标准化、设备撬装化、采集监控一体化等要求。通过对涪陵页岩

气田集气站所需的水套加热炉、气水分离器和管汇撬等主要设备进行撬装化集成优化设计,研发出了适用于涪陵页岩气“井工厂”集气站的水套炉撬、分离器撬、管汇撬等设备:

1) 设计了 400 kW 双盘管水套炉,开发了水套炉撬。满足了 1 套水套炉加热 2 口井的要求,水套炉撬具备为不同产量和压力的天然气加热、撬体内天然气放空、试压、工作状态自动监控、天然气产量调节、工艺参数远程传输等功能。

2) 开发了分离器撬。分离器撬具备清除天然气中水和固相杂质、自动排液、工作状态自动监控、安全泄放、天然气和水自动计量等功能。

3) 对相应型号的计量管汇、生产管汇和控制阀组进行组撬,形成了集气管汇撬。

目前,涪陵页岩气田已在焦石坝区块建设了 16 座集气站,地面集输设备已经基本实现撬装化。设备在制造厂进行撬装,减小了现场安装工作量,每套单井流程建设施工周期缩短了 16 d;同时,占地面积减少了 190 m²,水套炉每年节约燃料气 5.0×10^4 m³ 以上。撬装设备美观且操作方便,为气田安全、高效生产奠定了物资基础。

5 结论与认识

1) 山地“井工厂”布局优化设计技术实现了页岩气储层资源利用最大化和地面土地的集约利用,“井工厂”钻井与压裂作业模式和撬装建站技术实现了设备利用率最大化,极大缩短了作业时间,降低了工程成本。

2) 研究形成的适用于涪陵页岩气田的单钻机 2~4 井和双钻机 5~8 井“井工厂”的钻井模式、单机组拉链式“井工厂”压裂与双机组同步“井工厂”压裂

模式,实现了涪陵页岩气田当年完成建平台、钻井、压裂、试气、投产的开发需求。

3) 山地“井工厂”技术为涪陵页岩气田 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 一期产能建设的圆满完成提供了强有力的技术支撑,并成为涪陵页岩气国家级示范区的核心技术之一,也成为开发非常规油气藏的一种重要管理模式,对中国其他地区的页岩气开发建设提供了重要的借鉴和引领作用。

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]. SPE 151466, 2012.
- [2] BROWN K M, BEATTIE K, KOHUT C. High-angle gyro-while-drilling technology delivers an economical solution to accurate wellbore placement and collision avoidance in high-density multilateral pad drilling in the Canadian oil sands[R]. SPE 151431, 2012.
- [3] 刘社明, 张明禄, 陈志勇, 等. 苏里格南合作区工厂化钻井作业实践[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.
- [4] 赵文彬. 大牛地气田 DP43 水平井组的井工厂钻井实践[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 60-65.
ZHAO Wenbin. Drilling practice of a well plant in the cluster horizontal wells of DP43 in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 60-65.
- [5] 李克智, 何青, 秦玉英, 等. “井工厂”压裂模式在大牛地气田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 68-71.
LI Kezhi, HE Qing, QIN Yuying, et al. Application of “well plant” fracturing mode in Daniudi Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(1): 68-71.
- [6] 李鹞, Hii King-Kai, Todd Franks, 等. 四川盆地金秋区块非常规天然气工厂化井作业设想[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 54-59.
LI Shuang, KING-KAI H, FRANKS T, et al. Design highlights of factory-like production of unconventional natural gas wells in the Jinqiu Block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 54-59.
- [7] 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.
- [8] 牛新明. 涪陵页岩气开发钻井技术难题及对策[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.
- [9] 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.
- [10] 王志刚. 涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 425-430.
WANG Zhigang. Practice and cognition of shale gas horizontal well fracturing stimulation in Jiaoshiba of Fuling Area[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 425-430.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周贤海, 臧艳彬. 涪陵地区页岩气山地“井工厂”钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 45-49.
ZHOU Xianhai, ZANG Yanbin. Application of “well factory” drilling technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 45-49.

[编辑 令文学]