

渤海中深层探井水力喷射压裂可行性研究

张启龙^{1,2} 徐 刚^{1,2} 霍宏博^{1,2} 李 进^{1,2} 陈 卓^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;

2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300459

摘 要: BZ 19-6 油气田的有效开发对满足京津冀发展的能源需求有着重要作用,但由于潜山地层情况复杂、耐磨性高,探井的单井工期成本过高,考虑使用水力喷射压裂技术增加探井产能以满足探井转开发井的产量要求。通过对水力喷射压裂过程的流体力学分析,建立了一套水力喷射压裂参数设计方法,利用该方法并结合 BZ 19-6 油气田的储层埋深和海上作业规模,分析了水力喷射压裂技术在 BZ 19-6 油气田探井上应用的可行性。随着作业深度的增加,井口泵压和环空套压都随之增加,88.9 mm 和 114.3 mm 油管的极限水力喷射压裂深度分别为 5 700 m 和 6 800 m,满足 BZ 19-6 油气田对作业深度的要求。海上平台的设备能够满足水力喷射压裂在 BZ 19-6 油气田作业时排量、泵压、液量等方面的要求。预计作业工期比常规压裂缩短 50%,在降本增效方面优势明显。综合考虑作业深度、作业规模、设备要求、工期成本等多个方面因素,水力喷射压裂具备在 BZ 19-6 油气田探井上进行的条件,有望成为该油田探井转开发井的重要技术储备。

关键词: 渤海油田;渤海凹陷中深层;水力喷射压裂;可行性研究;探井转开发井

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.05.011

Feasibility Study on Hydraulic Jet Fracturing Technology for Exploration Wells Targeting Middle and Deep Layer in Bohai Oilfield

Zhang Qilong^{1,2} Xu Gang^{1,2} Huo Hongbo^{1,2} Li Jin^{1,2} Chen Zhuo^{1,2}

1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Tianjin, 300459, China

Abstract: Oil and gas field BZ 19-6 is the largest medium-deep oil and gas field found in Bohai Oilfield and even in China. It plays an important role in meeting the energy demand of the development of Beijing, Tianjin and Hebei. However, due to the complex conditions of buried hill formation and high wear resistance, the cost of single well construction duration was too high. Hydraulic jet fracturing technology was considered to increase the productivity of exploration wells to meet the production requirements of exploration wells into development wells. Based on the hydrodynamic analysis of hydraulic jet fracturing process, a set of parameters design method for hydraulic jet fracturing was established. Combining this

收稿日期:2020-06-13

基金项目:国家重大科技专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016 ZX 05058);国家自然科学基金重大资助项目“多重耦合下的页岩油气安全优质钻井理论”(51490652)

作者简介:张启龙(1988-),男,山东济南人,工程师,硕士,主要从事海洋石油完井工程领域的研究工作。E-mail:zhangql40@cnooc.com.cn

method with the limitation of reservoir depth and offshore operation capacity in oil and gasfield BZ 19-6, the feasibility of applying hydraulic jet fracturing technology to exploration wells in Bohai oilfield BZ 19-6 was analyzed. With the increase of operation depth, wellhead pump pressure and annulus casing pressure increased. The ultimate hydraulic jet fracturing depth of 88.9 mm and 114.3 mm tubing was 5 700 m and 6 800 m respectively, which met the requirements of oil and gasfield BZ 19-6 for operation depth. The equipments at offshore platform could meet the requirements of displacement, pump pressure and fluid volume of hydraulic jet fracturing of BZ 19-6 operation. The predicted operating duration was 50% shorter than that of conventional fracturing, which had obvious advantages in cost reduction and efficiency enhancement. Considering the operation depth, operation scale, equipment requirements, time & cost and other factors, hydraulic jet fracturing had the feasibility to work on exploration wells in oil and gasfield BZ 19-6, and would be expected to become an important technical reserve for exploration wells to be converted to development wells in this oilfield.

Keywords: Bohai oil field; Middle and deep layer of Bozhong sag; Hydraulic jet fracturing; Feasibility study; Conversion of exploration wells to development wells

0 前言

渤海中凹陷中深层油气构造(BZ 19-6 油气田)是渤海油田甚至中国发现的最大的中深层油气田,其对满足京津冀发展的能源需求有着重要的作用^[1-3]。BZ 19-6 油气田的储层为太古界潜山裂缝地层,其埋深大于4 000 m,在钻井探井过程中遇到地层压力系统复杂、岩石耐磨性高、井漏等复杂事故频繁等难题^[4-6],一口4 000 m探井的钻进时间大约为65 d,成本是常规探井成本的150%以上。因此保留探井转生产井是渤海油田未来高效和低成本开发BZ 19-6 油气田的重要方向,但渤海湾中深层属于低孔渗储层,而探井多为直井,如何保证直井的开采效率至关重要,除了部分学者提出的径向射流技术外^[7],对直井进行一定规模的压裂作业,穿透污染带、沟通储层、改善井底流动状态从而增加产能,也是重要的研究方向^[8-9]。

水力喷射压裂是一种集射孔和压裂为一体的增产措施,具有增产效果明显、占地面积小、作业时间短和管柱结构简单等优势^[10]。Surjaatmadja J B^[11]首先提出了水力喷射压裂的构想与方法,并通过室内试验和数值模拟的方法对其压裂机理进行了研究;李根生等人^[12]通过室内实验研究了8个主要参数对水力喷射压裂效果的影响规律,并形成最优参数组合;张毅等人^[13]通过数值模拟研究了射孔方向对裂缝拓展的导向作用,验证了水力喷射压裂的增产可行性;2005年,长庆油田在靖平1井实施了国内首次水力喷射压裂作业并取得较好效果,该技术逐渐在国内推广应用;2010-2019年,水力喷射压裂技术先后在中原油田、华北油田、新疆油田等成功应用数十口,增产效果明显^[14-15]。目前该技术增产机理的研究已较为成熟,在陆地油田已推广应用,但在海上油

田应用较少,其原因如下:1)受限于海上井槽间距较小,海上生产井的井口设备与陆地油田相比,其尺寸和耐压等级都明显降低,因此其对水力喷射压裂过程中的井口压力预测精度有更高要求,但目前对井口泵压和套压的计算方法较为粗糙^[15];2)海上需要进行压裂措施的低渗油田埋藏普遍较深,海上平台设备条件下的水力喷射压裂极限作业深度有待确定;3)受限于海上平台的空间限制,平台能否满足水力喷射压裂作业的施工规模和设备摆放的要求有待评估。

为了解决以上问题,建立了一套水力喷射压裂参数设计流程和井口压力预测方法,结合BZ 19-6探井的实际情况和海上作业平台的作业能力,评估了水力喷射压裂技术在海上平台的极限作业深度,并综合考虑了作业规模、设备要求、工期费用等多方面因素,分析了该技术在BZ 19-6油气田探井上应用的可行性。

1 参数设计方法研究

1.1 排量设计方法

进行水力喷射压裂作业设计时,首先要根据管柱尺寸和压裂需求,确定喷嘴数量和尺寸组合,根据喷嘴组合确定油管的流量范围,喷射速度计算公式见式(1)。

$$u_j = Q_1 / \left(60 \times \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^z d_i^2 \right) \quad (1)$$

式中: u_j 为喷射速度,m/s; Q_1 为射孔阶段油管流量, m^3/min ; d_i 为第*i*个喷嘴直径,m。

实验表明,当喷嘴喷射速度大于240 m/s时,射流可以较好地射穿地层和套管,因此选定喷嘴组合后,可以求出射孔阶段的排量范围($Q_1 \geq Q_{\min 1}$)^[16],计算结果见图1。

水力喷射压裂另一个关键指标是喷嘴压降,即喷嘴入口与喷嘴出口压力之差,其计算公式见式(2)。

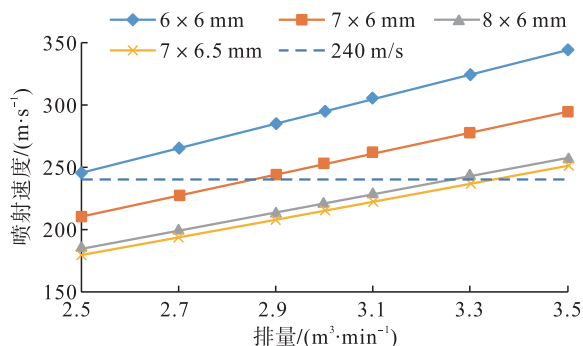


图1 不同排量下常用喷嘴的喷射速度图

Fig. 1 Jet velocity of common nozzles with different displacement

$$p_b = 513.559 Q_2^2 r / \left(\frac{\rho}{4} \sum_{i=1}^z d_i^2 \right)^2 C^2 \quad (2)$$

式中: Q_2 为压裂阶段油管排量, m^3/min ; p_b 为喷嘴压降, MPa; ρ 为流体密度, g/cm^3 ; C 为喷嘴流量系数, 一般常用喷嘴为 0.8~0.95。

室内和现场实验证明, 当喷嘴压降大于 30 MPa 时便可保证较好的压裂效果^[17], 因此可以求出压裂阶段流程范围 ($Q_1 \geq Q_{\min 2}$), 计算结果见图 2。

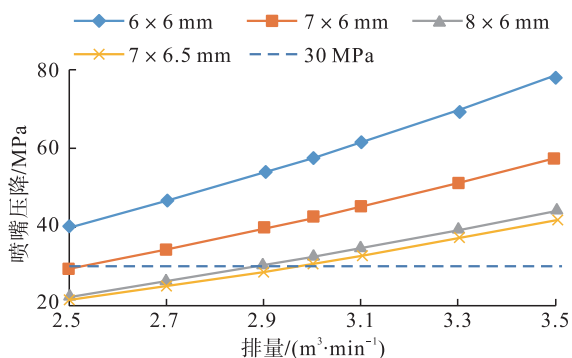


图2 不同排量下常用喷嘴的喷嘴压降图

Fig. 2 Nozzle pressure drop of common nozzles with different displacement

在实际作业阶段, 有两个基本原则: 1) 射孔和压裂阶段油管的排量尽量相同, 防止流量变化导致管柱变形量变化; 2) 射孔和压裂阶段的油管流量在满足基本要求后, 尽量取最小值, 减少管柱和设备的内部承压。因此, 可以得到射孔和压裂阶段的流量, 见式(3)。射孔阶段环空是敞开的, 而压裂阶段环空关闭, 并向环空进行补液, 其环空排量配合油管排量使流量达到设计的砂比需求, 利用式(4)便可求出环空排量。

$$Q_1 = Q_2 = \max(Q_{\min 1}, Q_{\min 2}) \quad (3)$$

$$S = Q_s / (Q_2 + Q_3 + Q_s) \quad (4)$$

式中: Q_3 为压裂阶段环空泵入排量, m^3/min ; Q_s 为陶粒流量, m^3/min ; S 为设计砂比。

1.2 地面泵压设计方法

水力喷射射孔阶段, 环空敞开, 因此环空套压为 0,

地面泵压只需要设计油管泵压即可。流体从油管泵入, 通过喷嘴喷射地层, 然后从环空返出到地面, 因此油管泵压如式(5)所示。

$$p_{wh} = p_b + f_{ft} + f_{fa} \quad (5)$$

式中: p_{wh} 为油管泵压, MPa; f_{ft} 为油管管柱流体沿程摩阻, MPa; f_{fa} 为环空内流体流动磨阻, MPa。

水力喷射压裂阶段, 环空关闭并向环空进行补液, 因此地面泵压需要设计油管泵压和环空泵压。油管内的流体从井口泵入, 经过喷嘴的加速后进入射孔孔道进行压裂作业, 其压力计算公式见式(6); 而环空流体从环空泵入后, 经过环空流道, 进入射孔孔道辅助压裂作业, 其压力计算公式见式(7)。

$$p_{wh} = p_b + f_{ft} - f_{fa} + p_a \quad (6)$$

$$p_a + p_h + p_{boost} - f_{fa} \geq p_{frac} \quad (7)$$

式中: p_a 为地面套管压力, MPa; p_h 为环空内静液柱压力, MPa; p_{boost} 为孔内增压值, MPa, 根据实验测定, 喷嘴压降为 30 MPa 时, 该值为 6 MPa; p_{frac} 为地层的起裂压力, MPa。

通过式(5)~(7)可知, 计算泵压的关键落脚到计算油管压耗 f_{ft} 和环空压耗 f_{fa} 。通过对现场实验参数的多元非线性拟合, 得到油管和环空压耗的计算公式^[18], 见式(8)和(9)。

$$\left\{ \begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{\delta}\right) &= 2.049\,95 - 1.152\,5 \times 10^{-4} \times \frac{d^2}{Q} - \\ &\quad 0.281\,9 \times 10^{-4} C_{HPG} \frac{d^2}{Q} - \\ &\quad 0.163\,9 \ln \frac{C_{HPG}}{0.119\,83} - \\ &\quad 3.015 \times 10^{-4} \times C_p e^{\left(\frac{0.119\,83}{C_{HPG}}\right)} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$f_{fa} = \delta \Delta p_0$$

$$\left\{ \begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{\delta}\right) &= 2.049\,95 - 1.152\,5 \times 10^{-4} \times \frac{(D - d_o)^2}{Q} - \\ &\quad 0.281\,9 \times 10^{-4} C_{HPG} \frac{(D - d_o)^2}{Q} - \\ &\quad 0.163\,9 \ln \frac{C_{HPG}}{0.119\,83} - \\ &\quad 3.015 \times 10^{-4} \times C_p e^{\left(\frac{0.119\,83}{C_{HPG}}\right)} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$f_{ft} = \delta \Delta p_0$$

式中: δ 为降阻比; D 为套管或井眼直径, mm; d 和 d_o 为油管的内径和外径, mm; C_{HPG} 为稠化剂浓度, kg/m^3 ; C_p 为支撑剂浓度, kg/m^3 ; Δp_0 为清水时的磨阻, MPa, 可以通过范宁公式求得。

1.3 参数设计流程

通过 2.1 和 2.2 节的介绍, 形成了一套水力喷射压裂参数设计流程, 具体流程见图 3。首先根据作业要求

优选水力喷嘴组合,利用式(1)求出流量的最小值之一 $Q_{\min 1}$;再根据式(2),计算不同流量的喷嘴压降,根据喷嘴压降大于 30 MPa 时压裂效果较好,求出流量的最小值之一 $Q_{\min 2}$;取 $Q_{\min 1}$ 和 $Q_{\min 2}$ 的最大值为设计射孔和压裂阶段的油管流量;根据设计砂比,利用式(4)计算压裂时的环空排量;根据设计流量利用式(5)计算射孔阶段的油管泵压;根据式(6)~(9),计算压裂阶段的油管和套管泵压。

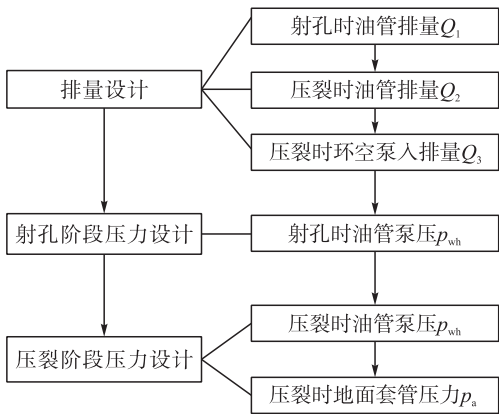


图 3 水力喷射压裂关键参数设计流程图

Fig. 3 Key parameters design process of hydraulic jet fracturing

1.4 实例验证

以某陆地油田 JZ-X 井为例,其深为 2 731 m,设计在 2 560、2 600、2 640 m 三个位置进行三段水力喷射压裂,该井的基本施工参数见表 1。以第二段压裂为例,根据我们的设计流程对该井的水力参数进行了设计:施工流量为 2.5 m³/min,射孔时的泵压为 62.53 MPa,压裂时的泵压为 66.97 MPa、套压为 16.03 MPa。将设计参数与实际作业参数进行对比,见图 4,射孔时的设计泵压误差为 5.55%,压裂时设计泵压误差为 1.52%,压裂时设计套压误差为 9.54%。该方法的平均误差都小于 10%,具有较高的精确性。该井严格按照设计参数进行施工,总共泵入支撑剂 30 m³、压裂液 506.7 m³,泵入效率为 100%,产生了缝高 10~15 m、缝长 50 m 的人工裂缝,压后产量为预测产量的 1.35 倍,验证了该设计方法的合理性。

表 1 JZ-X 井基础作业参数表

参数类型	参数值
完钻井深 /m	1 961
压裂位置 /m	1 219.5、1 195.0、1 168.0
生产套管参数 /mm	外径 139.70,内径 124.26
喷嘴参数 /mm	6×6
本体外径 /mm	108
油管外径 /mm	73
石英砂参数 /目	30~50
支撑剂参数 /目	20~40

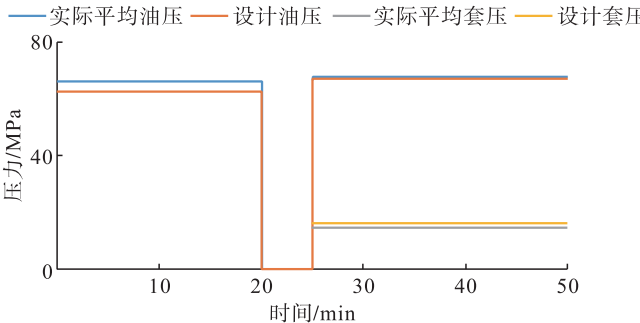


图 4 设计值与实际值的参数对比图

Fig. 4 Comparison of design and actual parameters

2 渤海中深层探井的技术可行性分析

2.1 深度对水力喷射压裂的影响

BZ 19-6 油气田的埋深在 4 000~7 000 m,根据设计流程,分别计算 88.9 mm 和 114.3 mm 两种尺寸油管条件下,常用喷嘴组合下的井口压力(射孔时的油压、压裂时的油压和套压)随深度的变化情况,计算结果见图 5~6。

通过计算可知,随着作业深度的增加,压裂时的井口泵压、环空套压以及射孔时的泵压都随之增加,考虑到海上平台井口设备的承压能力和人员安全,海上水力喷射压裂作业存在极限作业深度。当海上井口限压和环

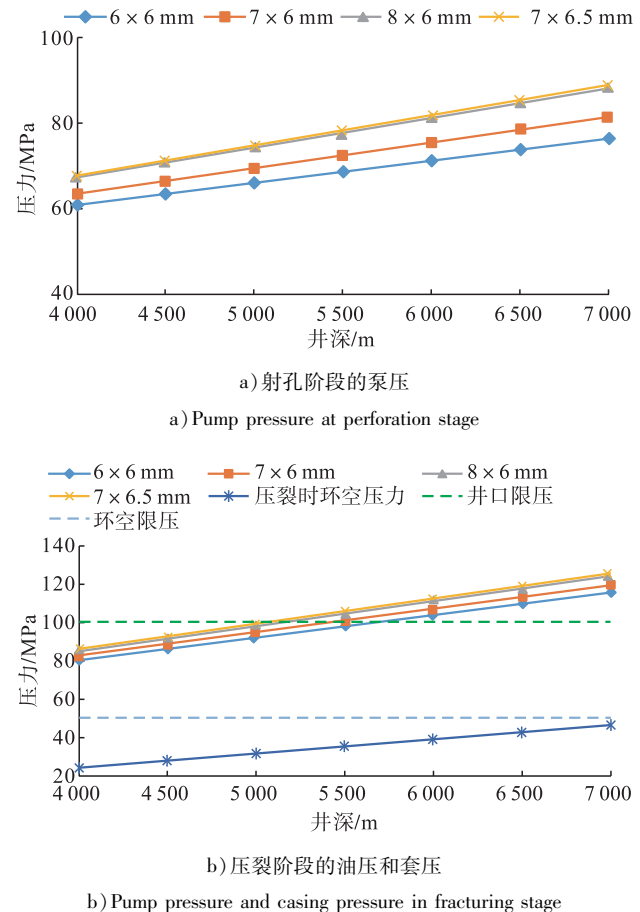
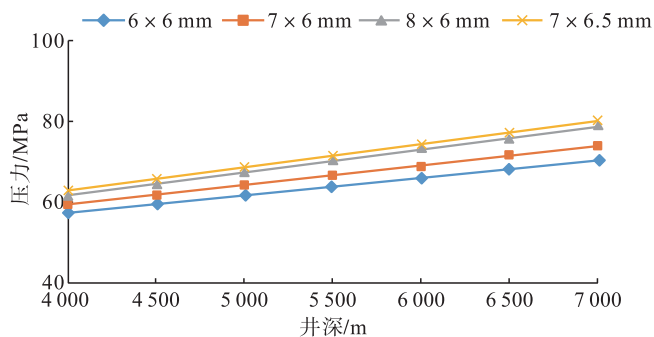


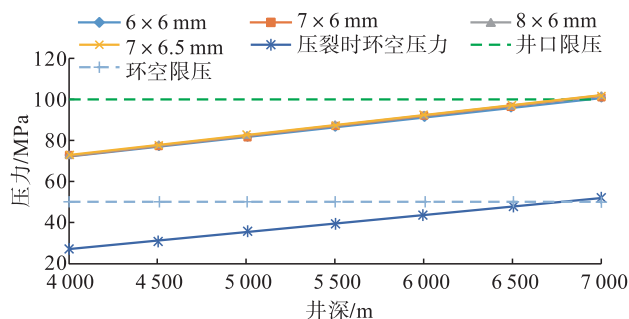
图 5 88.9 mm 油管作业时的计算结果图

Fig. 5 Calculation results during 88.9 mm tubing operation



a) 射孔阶段的泵压

a) Pump pressure at perforation stage



b) 压裂阶段的油压和套压

b) Pump pressure and casing pressure in fracturing stage

图6 114.3 mm 油管作业时的计算结果图

Fig. 6 Calculation results during 114.3 mm tubing operation

空限压分别为 100 MPa 和 50 MPa 时, 88.9 mm 和 114.3 mm 油管的极限水力喷射压裂深度分别为 5 700 m 和 6 800 m。渤中凹陷油气构造现阶段的开采层位在 7 000 m 之内, 因此水力喷射压裂在该区块是可以作业的, 当储层深度大于 5 700 m 时, 推荐采用 114.3 mm 油管进行作业。

2.2 海上平台适用性分析

除了作业深度外, 海上作业平台的规模是否能够满足水力喷射压裂的参数要求和设备需求也是决定该技术能否在渤海中深层成功实施的关键因素。从压裂设备需求和作业工期成本两个方面分析了该技术的可行性。

2.2.1 压裂设备需求

利用水力喷射压裂参数设计方法, 预测了该技术在 BZ 19-6 油气田中深层压裂作业的规模, 并根据施工规模的要求, 对海上作业平台的作业设备要求进行了评估。水力喷射压裂作业时, 油管排量 $< 3 \text{ m}^3/\text{min}$, 油管泵压 $< 100 \text{ MPa}$, 3 台 2000 型的压裂橇即可满足要求; 环空排量 $< 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$, 环空套压 $< 50 \text{ MPa}$, 1 台 2000 型的压裂橇即可满足要求; 总的压裂液用量 $< 200 \text{ m}^3$, 4 个清水罐即可满足要求; 总的加砂量 $< 20 \text{ m}^3$, 1 个清水罐即可满足要求。参考渤海低渗透储层压裂井施工经验, 压裂设备摆放见图 7, 压裂船或者自升式钻井平台都可以满足设备的摆放要求。

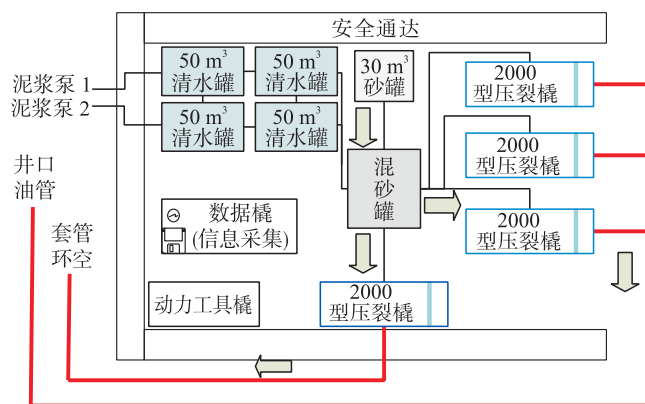


图7 海上平台设备摆放图

Fig. 7 Layout of offshore platform equipments

2.2.2 压裂工期费用

参考渤海低渗透储层压裂井作业工期^[19], 常规海上大规模压裂的工期平均为 1 d/层, 而水力喷射压裂采用水力喷射射孔代替常规炮弹射孔, 同时采用拖动式进行逐层压裂, 大规模节省了工期, 参考陆地油田作业经验, 平均工期约为 0.5 d/层, 大幅度降低了压裂的工期。而考虑到海上钻井船日租费用较高、作业成本较大, 水力喷射压裂技术具有明显的降本增效优势。

2.3 实例设计

以 BZ 19-6-X 1 井为例, 对该井进行水力喷射压裂设计。该井的井深为 4 567 m, 其开采的潜山储层在 4 200 ~ 4 300 m 之间, 设计在 4 225 m 和 4 275 m 两处进行水力喷射压裂, 增加其产能, 以满足探井转开发井的产量要求。根据第 1.3 节的关键参数设计流程进行设计, 参数如下: 喷嘴尺寸设计为 6 × 6 mm; 油管排量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$; 环空排量为 $1 \text{ m}^3/\text{min}$; 压裂时两段的预测油管泵压分别为 83.25、83.83 MPa, 环空套压分别为 25.57、25.94 MPa; 射孔时两段的预测油管泵压分别为 62.06、62.32 MPa; 两段的压裂液预测用量都为 170 m^3 , 加砂量都为 17 m^3 。根据海上平台的实际作业能力, 海上平台可以满足压裂施工参数的要求。根据施工规模及储层信息, 采用气藏低渗透压裂产能预测公式^[20], 预测该井压裂后的产气量为 $4.09 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 为直井常规射孔开发方式的 1.79 倍, 具有较好的增产效果。

3 结论

1) 本文提出了一套水力喷射压裂参数设计方法, 应用实例表明, 该方法具有较好的精确度和合理性, 未来可用于海上水力喷射压裂作业参数的优化设计。

2) 综合考虑作业深度、作业规模、设备要求等多方面因素对技术可行性的影响, 结果表明水力喷射压裂技术在 BZ 19-6 探井上具有较好的应用可行性和适用性, 有望成为该油田探井高效开发的重要技术储备。

3)根据计算的海上水力喷射压裂极限作业深度可知,该技术可以满足现阶段海上中深储层的开采要求,但随着开采深度的进一步增大,工作重点转为如何增加海上井口设备的耐压等级,以满足更深井作业的井口压力要求。

参考文献:

- [1] 施和生,王清斌,王 军,等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wang Jun, et al. Discovery and Exploration Significance of Large Condensate Gas Fields in BZ 19-6 Structure in Deep Bozhong Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24 (1): 36-45.
- [2] 徐长贵,于海波,王 军,等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
Xu Changgui, Yu Haibo, Wang Jun, et al. Formation Conditions and Accumulation Characteristics of Bozhong 19-6 Large Condensate Gas Field in Offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (1): 25-38.
- [3] 邓建明,马英文. 渤海中深层天然气田钻完井关键技术现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 677-683.
Deng Jianming, Ma Yingwen. Status and Prospect of Key Drilling and Completion Technologies Used in Middle-Deep Natural Gas Fields of the Bohai Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40 (6): 677-683.
- [4] 周心怀,张如才,李慧勇,等. 渤海湾盆地渤中凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 42-50.
Zhou Xinhuai, Zhang Rucai, Li Huiyong, et al. Major Controls on Natural Gas Accumulations in Deep-Buried Hills in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41 (1): 42-50.
- [5] 侯明才,曹海洋,李慧勇,等. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.
Hou Mingcai, Cao Haiyang, Li Huiyong, et al. Characteristics and Controlling Factors of Deep Buried-Hill Reservoirs in the BZ 19-6 Structural Belt, Bohai Sea Area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (1): 33-44.
- [6] 刘小刚,邓建明. 提高渤海中深层机械钻速技术应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 706-710.
Liu Xiaogang, Deng Jianming. Application of ROP Improvement Technology in Middle and Deep Strata of the Bohai Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40 (6): 706-710.
- [7] 张启龙,王 斌,田守增,等. 渤海中深层探井径向射流技术可行性研究[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 17-23.
Zhang Qilong, Wang Bin, Tian Shouzheng, et al. Feasibility Study on Radial Jet Technology for Exploration Wells Targeting Middle and Deep Layer in Bohai Oilfield [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47 (5): 17-23.
- [8] 王 磊. HZ油田特低渗油藏压裂后有效开发研究与应用[J]. 天然气与石油, 2016, 34(4): 50-54.
Wang Lei. Research and Application of Effective Development for Extra-Low Permeability Reservoir in HZ Oil Field after Fracture [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (4): 50-54.
- [9] 赵 杰,罗森曼,张 斌. 页岩气水平井完井压裂技术综述[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 48-51.
Zhao Jie, Luo Senman, Zhang Bin. Review on Completion Fracturing Technology for Horizontal Shale Gas Well [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 48-51.
- [10] 刘永亮,王振铎,胥 云,等. 水平井储层改造新方法——水力喷射压裂技术[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 71-73.
Liu Yongliang, Wang Zhenduo, Xu Yun, et al. A New Hydraulic Jet Fracturing Technique Used for Horizontal Wells Stimulation [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31 (1): 71-73.
- [11] Surjaatmadja J B. Subterranean Formation Fracturing Methods: US 5765642 [P]. 1998-06-16.
- [12] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等. 水力喷砂射孔机理实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 31-34.
Li Gensheng, Niu Jilei, Liu Zekai, et al. Experimental Study on Mechanisms of Hydraulic Sand Blasting Perforation for Improvement of Oil Production [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26 (2): 31-34.
- [13] 张 毅,李根生,熊 伟,等. 高压水射流深穿透射孔增产机理研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 38-41.
Zhang Yi, Li Gensheng, Xiong Wei, et al. Stimulation Mechanism of Oil Well Using High-Pressure Water Jet Deep-Penetrating Perforation Technique [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28 (2): 38-41.
- [14] 朱正喜,曹 会,陈沙沙. 国内水力喷射压裂工艺技术应用研究进展[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(12): 82-87.
Zhu Zhengxi, Cao Hui, Chen Shasha, et al. Application and Development of Hydraulic Jet Fracturing in China [J]. Oil Field Equipment, 2014, 43 (12): 82-87.

- [15] 田守增,李根生,黄中伟,等.水力喷射压裂机理与技术研究进展[J].石油钻采工艺,2008,30(1):58-62.
Tian Shouceng, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Research on Hydraulicjet Fracturing Mechanisms and Technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30 (1): 58-62.
- [16] 牛继磊,李根生,宋剑,等.水力喷砂射孔参数实验研究[J].石油钻探技术,2003,31(2):14-16.
Niu Jilei, Li Gensheng, Song Jian, et al. An Experimental Study on Abrasive Water Jet Perforation Parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31 (2): 14-16.
- [17] 李根生,夏强,黄中伟,等.深井水力喷射压裂可行性分析及设计计算[J].石油钻探技术,2011,39(5):58-62.
Li Gensheng, Xia Qiang, Huang Zhongwei, et al. Feasibility Study and Treatment Design of Hydrojet-Fracturing in Deep Wells [J]. Drilling Petroleum Techniques, 2011, 39 (5): 58-62.
- [18] 黄禹忠,何红梅.川西地区压裂施工过程中管柱摩阻计算[J].特种油气藏,2005,12(6):71-73.
Huang Yuzhong, He Hongmei. Calculation of Pipe String Friction During Fracturing Operation in Chuanxi Area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12 (6): 71-73.
- [19] 刘鹏,徐刚,陈毅,等.渤海低渗透储层水平井分段压裂实践与认识[J].天然气与石油,2018,36(4):58-63.
Liu Peng, Xu Gang, Chen Yi, et al. Practice and Understanding on Horizontal Well Staged Fracturing in Bohai Low Permeability Reservoirs [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 58-63.
- [20] 冷润熙,郭肖.低渗透气藏直井压裂产能评价公式[J].油气藏评价与开发,2014,4(1):21-25.
Leng Runxi, Guo Xiao. Deliverability Evaluation Formula of Vertical Well Fracturing in Low Permeability Gas Reservoirs [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4 (1): 21-25.

西南油气田最大增压机组建成并试运行成功

2020年9月15日,蜀南气矿合江采气作业区兴文增压站建成,首次成功试运行,16日通过完工交接,为长宁页岩气外输再添新动力。

宁纳线增输工程为中国石油天然气集团有限公司2020年重点工程之一。宁纳线增输工程的建设,主要是解决长宁(含昭通)页岩气的上产外输要求,在分输低压用户后,将其余气量增压外输至川渝骨干管网和上载至中贵线,主要工程内容为:接收长宁页岩气田来气,增压后将天然气输送至下游的输气管理处纳溪西站,相比增输前最大输气量可增加 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

宁纳线增输工程于2019年12月11日开工,新建的兴文增压站于2020年8月29日已具备进气条件。该站主要功能为过滤分离、分离输送,包含35 kV供配电,采用国产离心式压缩机组,单机功率8.8 MW,是目前西南油气田公司最大的增压机组。自此,川南页岩气外输干线宁纳线的“两站一线”格局正式形成,2019年10月投运了纳溪页岩气外输增压中心站,如今投运了兴文增压站,宁纳线日输气能力可提升至 $2150 \times 10^4 \text{ m}^3$,为下步川南页岩气区块产能发挥打下了坚实基础,为气矿建设千万吨级大油气矿再添“核心力量”。

(王路 摘编自气韵蜀南微信公众号)