

异常高压储层水力喷砂射孔多层压裂投产技术

贾洪革¹, 孙杰文², 何昊楠³, 余伟¹, 张宝瑞³, 邵昭媛²

1. 中国石油国际勘探开发有限公司 中油阿克纠宾油气股份公司 北京 100034

2. 中国石油勘探开发研究院工程技术研究所 北京 100010

3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: sunjiewen69@petrochina.com.cn

项目支持: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目子课题“中亚和中东地区复杂碳酸盐岩油气藏采油采气关键技术研究与应用”(2017ZX05030-005)

引用: 贾洪革, 孙杰文, 何昊楠, 等. 异常高压储层水力喷砂射孔多层压裂投产技术[J]. 油气井测试, 2020, 20(4): 40-44.

Cite: JIA Hongge, SUN Jiewen, HE Haonan, et al. Commissioning technology of hydraulic abrasive perforating and multi-layer fracturing in abnormal high-pressure reservoirs [J]. Well Testing, 2020, 20(4): 40-44.

摘要 哈萨克斯坦肯基亚克油田盐下二叠系砂岩油藏压力系数超过1.7, 采用常规射孔后压裂工艺或者适用于常压储层的不动管柱喷砂射孔压裂工艺, 存在井控风险大、转层作业周期长、改造不彻底等技术难题。为提高单井产能, 在单层水力喷射加砂压裂技术获得显著增产效果后, 研发出逐级坐封封隔器和带滑套喷枪, 通过理论参数计算, 实现了工艺优化与入井管柱的组配, 形成异常高压储层水力喷砂射孔多层压裂投产技术。在现场完成了3口井不动管柱逐级坐封单井分两层喷砂射孔加砂压裂工艺的现场试验, 成功率100%。措施后平均单井日增油52.3 t; 现场施工数据显示, 转层后两层水力喷砂射孔时的射孔压力差小于2 MPa, 验证了该工艺在理论上满足3层以上的压裂改造。该工艺实现了不压井条件下多套储层的射孔、压裂改造及投产一体化作业, 对高压油气井储层改造具有推广意义。

关键词 高压油藏; 多层; 喷砂射孔; 逐级坐封; 封隔器; 喷枪; 压裂

中图分类号: TE358 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.007

Commissioning technology of hydraulic abrasive perforating and multi-layer fracturing in abnormal high-pressure reservoirs

JIA Hongge¹, SUN Jiewen², HE Haonan³, YU Wei¹, ZHANG Baorui³, SHAO Zhaoyuan²

1. International Exploration and Development Co. Ltd., CNPC Aktubin Oil & Gas Co. Ltd., Beijing 100034, China

2. Institute of Engineering Technology, CNPC Research Institute of Petroleum Exploration Development, Beijing 100010, China

3. China University of Petroleum (Beijing) Karamay Campus, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: The pressure coefficient of the subsalt Permian sandstone reservoir in the Kenkiyak Oilfield in Kazakhstan exceeds 1.7. There exist some technical problems, such as high well control risk, long operation period when replacing layers, and incomplete stimulation, if adopting conventional post-perforation fracturing process or hydraulic abrasive perforation fracturing process with fixed string suitable for normal pressure reservoirs. In order to increase single-well productivity, after achieving a significant increase in production of a single layer with hydraulic abrasive fracturing technology, the step-by-step setting packer and the spray gun with a sliding sleeve have been developed. Through the calculation of theoretical parameters, the matching between process optimization and well pipe string has been realized, forming the commissioning technology of hydraulic abrasive perforating and multi-layer fracturing in abnormal high-pressure reservoirs. The field test of three wells using hydraulic abrasive fracturing technology in two layers for each well with step-by-step setting fixed pipe string was completed, with a success rate of 100%. After the stimulation, the average oil production rate increases for a single well is 52.3 t. The field operation data shows that the perforating pressure difference of the two layers after the layer replacement is less than 2 MPa during the hydraulic abrasive perforating, which verifies that the process can theoretically meet the fracturing stimulation of more than 3 layers. This technology realizes the integrated operation of perforating, fracturing and commissioning of multiple reservoirs without killing wells, and has popularization significance for reservoir stimulation with high-pressure oil and gas wells.

Keywords: high-pressure reservoir; multiple layers; abrasive perforation; step-by-step setting; packer; spray gun; fracturing

水力喷砂压裂技术是套管井通过喷砂形成孔眼后直接进行压裂的一项工艺技术,具有一定的射孔和压裂联作的特点,尤其是在水平井进行多段连续油管拖动喷砂酸压。近年来,各大石油公司和专家学者也针对该项技术做了较多研究,在射流介质和形式上,诸如磨料、脉冲和空化射流上,从理论参数技术和现场应用均取得了一系列的研究成果,拓展了水力射流的技术体系。利用水动力原理形成的水力喷射辅助压裂技术在油气开采的应用逐渐完善。随着研究的深入和工艺技术的不断进步,水力喷射压裂技术在世界范围内得到迅速推广,但在其配套工艺上还需进行具体的衍化完善^[1-4]。

水力喷射辅助压裂技术中一种是在不动管柱的情况下进行压裂改造,利用不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺无需机械封隔器,通过水动力封隔原理,可以实现储层的多层改造。该技术在低压或常压储层中应用较为成功^[5-9],但是针对高压或异常高压储层进行多层压裂转层时,由于高压低渗地层停泵压力高,裂缝闭合慢,采用油嘴控制放压周期长,无法进行第二层水力喷砂作业。如果采用常规的射孔后换压裂管柱改造的作业方式,则存在较大的井控风险。因此,高压储层的多层加砂压裂采用常规的作业方式,则不可避免存在井控风险大、转层作业周期长、改造不彻底等技术难题^[10-12]。

本文即针对上述技术难题,以哈萨克斯坦肯基亚克油田盐下二叠系高压深层砂岩为研究对象,开展了逐级坐封封隔器不动管柱水力喷砂射孔多层压裂改造技术研究,在研发逐级坐封封隔器和带滑套喷枪两项核心工具的基础上,通过工艺优化和理论参数计算,实现了不动管柱完成两层的逐级坐封分层喷砂射孔加砂压裂,并在3口井上成功应用。

1 技术难点

与低压、常压储层不同,打开高压储层时存在更多的技术难题和井控风险,比如采用常规传输射孔工艺时要同时考虑高压储层的防喷和过高密度压井液的污染,采用密闭的常规水力喷砂射孔工艺在不压井条件下只能安全的完成一套储层的打开,转层射孔时存在困难。

1.1 常规射孔作业井控风险大

肯基亚克油田盐下二叠系砂岩油藏地层压力高,原始地层压力系数1.70~1.85,个别储层段甚至超过2.0。由于产层为透镜型油藏,不同井、不同油

层之间压力存在差异,进行常规压裂前,需要进行射孔作业。由于常规油管传输、电缆传输射孔及射孔后下入压裂管柱作业需要配合压井作业^[13-14]。因此,选用一种密度压井液体体系作业不同层系时存在较大井控风险,从井控工作方面看,常规射孔压裂技术在该油田适应性差。

1.2 压井作业对储层伤害大

为降低井控作业风险,在进行常规射孔及起下管柱作业前,一般根据储层最高预测压力选用合适密度的压井液,高密度压井液在储层射开后,进入地层压力相对较低储层段,对低渗储层造成严重伤害^[15-16]。因此,从储层保护工作方面看,采用常规射孔枪提前将各油层射开,然后再下入多层压裂工具的压裂工艺在该油田也不适用。

1.3 常规水力喷砂射孔压裂转层时射孔控压困难

水力喷砂射孔压裂工艺采用水力喷砂射孔+压裂投产一体化压裂技术,解决了常规射孔工艺对储层伤害大及井控风险大的技术难题,适用于该区块的单层加砂压裂技术改造。与低压、常压储层不同的是,采用常规不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺在进行转层时,由于高压低渗地层第一层压裂停泵压力高,裂缝闭合时间长,采用油嘴控制放压周期长。因此,在高井口压力条件下,无法进行第二层水力喷砂射孔作业(射孔作业需敞开套管井控压),适用于低压、常压储层的常规不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺不能实现该油田砂岩储层的多层压裂改造。

2 技术措施

为解决高压储层水力喷砂射孔转层时存在的难题,在常规水力喷砂射孔压裂工艺的基础上,通过引入核心工具逐级坐封封隔器,成功实现了高压储层的多层射孔、压裂改造及生产一体化。

2.1 技术思路

制作逐级坐封封隔器,设计逐级坐封+多层水力喷射压裂管柱结构,实现在第一层水力喷砂射孔及压裂过程中,逐级坐封封隔器不坐封,在第二层射孔及压裂前,打开封隔器坐封进液通道,通过坐封封隔器,封堵已压裂高压层。因此,即使不采用旋塞阀或合适油嘴控制地面套压,高压油气流也无法进入环空返出地面,射孔泵压远低于压裂设备、井口、井下管柱最大额定工作压力,从而可顺利实现第二层的水力喷砂射孔及压裂。

2.2 管柱设计

逐级坐封+多层水力喷射压裂生产一体化压裂管柱结构自下而上(图1):导向头+筛管+单流阀+套管喷枪 1#(无滑套)+逐级坐封封隔器+套管喷枪 2#(带滑套)+完井滑套+安全接头+气举阀 1+气举阀 2。

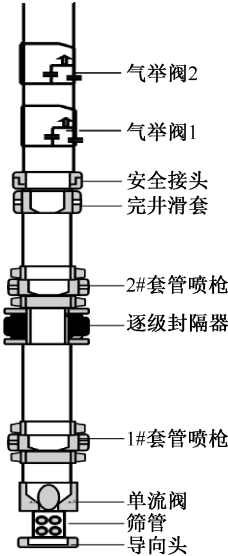


图1 逐级坐封+水力喷射多层压裂生产一体化压裂管柱结构示意图
Fig.1 Integrated fracturing string structure of step-by-step setting+hydraulic jetting multi-layer fracturing producing

2.3 核心工具及工作原理

高压储层多层水力喷砂射孔压裂工艺工序是:对第一层喷砂射孔后进行压裂改造,第一层压裂结束停泵投球,待球到达封隔器滑套处,通过打压打开封隔器进液孔,利用液压原理坐封封隔器,封闭已压裂层油套环空,然后再次投球,待球到达第二层喷枪滑套处,通过打压打开喷枪喷嘴,进行第二层喷砂射孔及压裂改造。实现高压储层多层水力喷砂射孔压裂工艺的关键主要是引入了带滑套喷枪和逐级封隔器等核心工具。

2.3.1 带滑套喷枪

在射孔、压裂第一层时,第二层带滑套喷枪中滑套处于关闭状态,压裂液无法通过喷嘴进入套管,只能通过不带滑套的喷嘴进入套管(图2)。

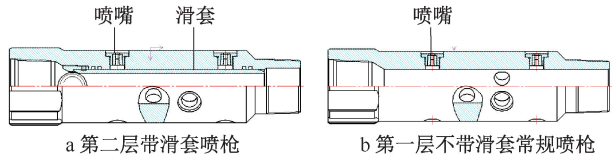


图2 带滑套/不带滑套喷枪
Fig.2 Spray gun with/without sliding sleeve

在压裂第一层时,第二层喷枪喷嘴使用喷枪滑套进行封堵,第一层压裂结束,投入树脂球,打压将滑套销钉剪断,使第二级喷枪处于工作状态,实现第二层水力喷射压裂。喷嘴优选 8 个×φ6.3 mm 组合喷嘴。实验证明,为获得较好的射孔及压裂效果,建议喷射速度大于 160 m/s。因此,要求油管泵注排量大于 2.5 m³/min,喷射排量与喷射速度关系见表 1。

表 1 喷射排量与喷射速度关系
Table 1 Relationship between injecting displacement and injecting speed

序号	排量/(m ³ ·min ⁻¹)	喷射速度/(m·s ⁻¹)
1	1.0	67
2	1.5	100
3	2.0	134
4	2.5	167
5	3.0	201
6	3.5	234

2.3.2 逐级坐封封隔器

逐级封隔器是具有特殊结构的水力扩张式封隔器,内置滑套将液压传递进液孔封闭,在不打开滑套的情况下,封隔器不会扩张坐封。

逐级坐封封隔器内部具有特殊滑套,在压裂第一层时,由于滑套的作用,封隔器处于不工作状态,压裂第二层前,投入树脂球,打压将特殊滑套销钉剪断,通过压差原理坐封封隔器,封堵高压油气层。

2.4 水力喷砂射孔压力计算

由于高压储层在转层射孔时存在泵压高的技术难题,为验证射孔泵压是否满足工艺要求,对射孔泵压进行了计算。

$$p_p = p_{asp} + D_{pt} + D_{pa} + p_b \tag{1}$$

式中: p_p 为射孔泵压,MPa; p_{asp} 为地面环空压力,MPa; D_{pt} 为携砂液在油管中的摩阻,MPa; D_p 为携砂液在环空中的摩阻,MPa; D_{pa} 为携砂液在油管中摩阻,MPa; p_b 为喷嘴压降,MPa。

2.4.1 管柱摩阻计算

射孔过程中,携砂液在油管中的摩阻与排量、砂液比的关系为

$$D_{pt} = 1.298\,81e^{-a}Q^{1.8} \tag{2}$$

其中

$$a = 2.049\,95 - 1.398\,5/Q - 0.005\,48C_p - 0.594\,26$$

射孔过程中,携砂液在环空中的摩阻与排量、砂液比的关系为

$$D_{pa} = 0.189\,56e^{-a}Q^{1.8} \tag{3}$$

其中
 $a = 2.049\,95 - 3.118\,28/Q - 0.005\,48C_p - 0.594\,26$
式中: Q 为排量, m^3/min ; e 为自然常数(其值约为 2.718 28); C_p 为砂液比, %。

携砂液在管柱中的密度与砂液比的关系式为
 $M_d = (1.020\,0 + 0.017\,2C_p)/(1 + 0.005\,5C_p)$
(4)

携砂液在管柱中静液柱梯度与密度之间关系式为

$$D_{ph} = 9.8M_d$$
 (5)

式中: M_d 为携砂液在管柱中的密度, g/cm^3 ; D_{ph} 为携砂液在管柱中的静液柱梯度, MPa/m 。

2.4.2 喷嘴压降计算

水力喷射压裂工具的喷嘴压降可用下式表示,即

$$p_b = 513.559Q^2\rho/(A^2C^2)$$
 (6)

式中: p_b 为喷嘴压降, MPa ; Q 为排量, L/s ; ρ 为流体密度, g/cm^3 ; A 为喷嘴总面积, mm^2 ; C 为喷嘴排量系数(一般值取 0.9)。

第一层压裂结束后,在第二层水力喷射压力前,需要采用旋塞阀或合适油嘴控制地面套压,保证已压裂油层流体不进入环空,由于肯基亚克油田盐下二叠系储层压力系数高达 1.70~1.85,地面环

空压力 p_{asp} 至少要达到 29.4~35.7 MPa,才能保证已压裂层流体不进入环空。采用(1)~(6)式计算的射孔压力高达 79.6 MPa,而气举阀工作压力只有 70.0 MPa,且采用旋塞阀或合适油嘴控制地面套压难度大,风险高。因此,常规水力喷射多层压裂不适用于异常高压储层多层水力喷砂射孔压裂。通过引入逐级坐封封隔器后,在第二层射孔时,采用封隔器将第一压裂层封堵,射孔时无需控制地面套压,此时射孔泵压最高只有 50.2 MPa,满足设备及工具承压要求。

3 现场应用情况

经过针对区块作业井的研究,制定了如下压裂工艺流程:控制套压进行第一层水力喷砂射孔,压裂第一层,打开封隔器坐封通道,坐封封隔器,打开第二级水力喷枪滑套,进行第二层水力喷砂射孔,压裂第二层,放喷求产。

2017~2019 年,异常高压储层不动管柱多层水力喷射压裂技术在肯基亚克油田盐下二叠系油藏现场应用 3 井次/6 层次,施工成功率 100%,措施后平均单井日增油 52.3 t,措施增油效果显著。异常高压储层不动管柱多层水力喷射压裂技术应用情况统计见表 2。

表 2 应用情况统计表
Table 2 Applying statistics

井号	压裂层位	压裂井段/ m	套管规格/ mm	储层 压力系数	渗透率/ mD	射孔泵压/ MPa	措施日增油/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)
xxx9	P1-Ⅲ+P1-Ⅳ	4 129.6~4 144.4	168.3+139.7	1.95	0.1	54.8~67.1	91
		4 001.1~4 014.1			1.3		
xxx6	P1-Ⅳ	4 192.8~4 206.3	177.8	1.62	7.7	41.0~56.0	35
		4 161.0~4 177.1			11.3		
xxx8	P1-Ⅳ	4 212.6~4 223.2	177.8+114.3	1.73	4.5	40.0~69.0	31
		4 178.3~4 203.6			6.6		

4 结论

(1) 针对异常高压砂岩油藏改造,与常规油管传输射孔+压裂技术相比,水力喷砂射孔+压裂投产一体化压裂技术不需要提前进行常规射孔作业,减少压井作业工序,因此井控工作风险小,对储层伤害小,且作业周期短,工艺适应性强。

(2) 针对低压或常压储层压裂改造,不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺无需机械封隔器,利用水力封隔原理,可以实现储层的多层改造,但是针对高压或异常高压储层进行多层压裂转层时,

存在由于高压低渗地层停泵压力高,裂缝闭合慢,采用油嘴控制放压周期长,无法进行第二层水力喷砂射孔作业的技术难题。

(3) 采用逐级坐封工艺,对不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺进行改进,形成的逐级坐封+不动管柱多喷枪多层水力喷射压裂工艺,有效解决了高压储层转层时水力喷砂射孔技术难题,实现了不压井条件下,多套储层的射孔、压裂改造及投产一体化作业。

(4) 从现场 3 井次/6 层次施工情况看,进行两层水力喷砂射孔时的射孔压力差异不大,一般在

2 MPa 以内,因此,该管柱技术理论上满足三层、四层甚至更多层的压裂改造。

致谢: 本论文在完成过程中得到了西部钻探工程有限公司王勇工程师的大力协助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 李根生,宋剑,熊伟,等. 高压水射流射孔渗流场模型及计算[J]. 石油勘探与开发,2005,32(6):97-100.
LI Gensheng, SONG Jian, XIONG Wei, et al. Simulation model and calculation of seepage flow field for high pressure waterjet perforated wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(6):97-100.
- [2] 王新君. 基于压裂施工曲线计算储层地应力[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2018,20(3):10-13.
WANG Xinjun. Computation of reservoir stress value based on fracturing curve [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 20(3):10-13.
- [3] 高志军,吴庭,王卫忠. 拖动管柱水力喷射分段压裂工艺在 HH42P1 井的现场试验[J]. 油气藏评价与开发,2013,3(4):50-55.
GAO Zhijun, WU Ting, WANG Weizhong. Field test of dragging string hydraulic jet staged fracturing technology of Well HH42P1 [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013,3(4):50-55.
- [4] 田守崙,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 Shouzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on hydrjet fracturing mechanisms and technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(1):58-62.
- [5] 马发明. 不动管柱水力喷射逐层压裂技术[J]. 天然气工业,2010,30(8):25-28.
MA Faming. Zone by zone hydrojet fracturing without pulling strings [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8):25-28.
- [6] 冯广庆,谢宇. 高温高压油气井井下作业技术在迪那 2 气田的应用[J]. 油气井测试,2007,16(4):39-41,43.
FENG Guangqing, XIE Yu. Application of dowehole operation technology for HTHP oil & gas well in Dina2 gas field [J]. Well Testing, 2007,16(4):39-41,43.
- [7] 雷群,李益良,李涛,等. 中国石油修井作业技术现状及发展方向[J]. 石油勘探与开发,2020,47(1):155-162.
LEI Qun, LI Yiliang, LI Tao, et al. Technical status and development direction of workover operation of PetroChina [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1):155-162.
- [8] 郑道明,贺绍华,贾光亮. 连续油管水平井滑套钻铣工艺技术[J]. 油气井测试,2019,28(2):45-50.
ZHENG Daoming, HE Shaohua, JIA Guangliang. Technology of sliding sleeve milling in horizontal well using coiled tubing [J]. Well Testing, 2019,28(2):45-50.
- [9] 孙杰文,张宝瑞,刘刚,等. 高压深井连续油管复合解堵工艺[J]. 油气井测试,2020,29(3):45-49.
SUN Jiewen, ZHANG Baorui, LIU Gang, et al. Compound plug removal technology using coiled tubing for high pressure wells [J]. Well Testing, 2020,29(3):45-49.
- [10] 马发明,桑宇. 连续油管水力喷射压裂关键参数优化研究[J]. 天然气工业,2008,28(1):76-78.
MA Faming, SANG Yu. Optimized key parameters of hydraulic fracturing combined with coiled tubings [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(1):76-78.
- [11] 刘友权,唐永帆,石晓松,等. CT 低伤害压裂液在广安须家河储层加砂压裂的应用[J]. 石油与天然气化工,2008,37(5):416-418,447.
LIU Youquan, TANG Yongfan, SHI Xiaosong, et al. The application of CT low damage fracturing in the Guang'an Xujiahe reservoir [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2008,37(5):416-418,447.
- [12] 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.
- [13] 张高群,刘祖林,乔国锋,等. 水力喷射加砂压裂技术在中原油田的研究应用[J]. 钻采工艺,2010,33(5):65-66,71.
ZHANG Gaoqun, LIU Zulin, QIAO Guofeng, et al. Research and application of hydro jet sand fracturing technique in Zhongyuan Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(5):65-66,71.
- [14] 李志龙. 苏 10-30-38H 水平井水力喷射加砂压裂的研究与应用[J]. 特种油气藏,2009,16(4):82-86.
LI Zhilong. Study and application of hydrojet sand fracturing for horizontal Well Su10-30-38H [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009,16(4):82-86.
- [15] 艾昆,李谦定,袁志平,等. 清洁转向酸压技术在塔河油田的应用[J]. 石油钻采工艺,2008,30(4):71-74.
AI Kun, LI Qianding, YUAN Zhiping, et al. Application of acid fracturing technology with visco-elastic surfactant acid in Tahe Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(4):71-74.
- [16] 伊向艺,卢渊,宋毅,等. 靖边气田白云岩储层交联酸压技术实践[J]. 油气地质与采收率,2008,15(6):92-94.
YI Xiangyi, LU Yuan, SONG Yi, et al. Acid fracturing technology practice of cross-linking acid fluid in dolomite reservoir of Jingbian gasfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008,15(6):92-94.

编辑 王 军

第一作者简介: 贾洪革,男,1979 年出生,高级工程师,2004 年毕业于大庆石油学院机械设计制造及其自动化专业,现主要从事采油采气工艺方面的科研及现场推广应用等工作。电话:010-83596080; Email: jiahongge@cnpc-amg.kz。通信地址:北京市西直门中国石油国际勘探开发有限公司,邮政编码:100034。