

拖动式水力喷射分段压裂工艺在筛管水平井完井中的应用

曲 海^{1,2}, 李根生², 刘 营²

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要:为实现筛管水平井储层有效压裂改造和降低施工风险,对拖动式水力喷射分段压裂工艺进行了优化改进。根据水力喷射分段压裂工艺技术射流增压、射流密封和降低起裂压力的基本原理,结合筛管水平井的井况及特点,将拖动式水力喷射分段压裂工具与滑套式工具相组合,融合相应的施工工艺,降低了筛管并压裂管柱砂卡风险。成功对筛管水平井 SA 井实施 3 段加砂压裂,最高施工砂比达到 40%,压裂规模 72 m³,压裂管柱成功上提出井。裂缝监测结果表明,在水平段压裂位置产生了 3 条走向明显的裂缝,裂缝长度均为 110~135 m,与设计长度吻合较好,实现了储层分段压裂目的。该井产油量由原来的 4.0~5.0 t/d 提高到 25.9 t/d,压裂增产效果明显。

关键词:水力喷射 分段压裂 水平井 筛管完井 裂缝监测

中图分类号:TE357.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)03-0083-04

The Application of Dragged Multistage Hydrojet-Fracturing in Horizontal Well with Screen Pipe Completion

Qu Hai^{1,2}, Li Gensheng², Liu Ying²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to stimulate horizontal wells with screen completion and decrease the risk in treatment, the dragged multistage hydrojet-fracturing (DHJF) was improved. Considering the characteristics of hydrojet technique, namely boosting pressure, sealing mechanism and decreasing the initial fracturing pressure, and the characteristic of screen completion, the jetting tool and sliding sleeve tools were combined and assembled at the end of treatment pipes. Then the DHJF was optimized to solve the problem of sanding in the fracturing string. The sanding risk of fracturing string could be greatly decreased. A horizontal well under screen completion was successfully fractured by DHJF. With 72 m³ proppants in total and the highest sand ratio of 40%, the length of three hydraulic fractures reached 110-135 m. Finally, the fracturing string was pulled out of the well. Micro-seismic mapping indicated that three hydraulic fractures were placed at strategically selected locations which improved the formation permeability. Daily oil production of Well SA increasede from 4.0-5.0 t/d to 25.9 t/d, proving good stimulation result in this well.

Key words: hydraulic jetting; staged fracturing; horizontal well; screen pipe completion; fracture monitoring

水力喷射分段压裂是目前低渗透油气储层改造的主要技术手段。1998 年, Halliburton 公司工程师 Surjaatmadja 提出了水力喷射压裂技术, 成功应用于水平井分段压裂中, 并相继在双分支井、裸眼井、套管井和筛管井中获得广泛应用^[1-3]。2007 年, 该技术引入中国, 经过国内学者的研究与创新^[4-6],

收稿日期:2011-08-15; **改回日期:**2012-04-13。

作者简介:曲海(1981—),男,山东潍坊人,2008年毕业于西南石油大学机械设计及理论专业,2011年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,工程师,主要从事油气开采和增产新技术研究。

联系方式:(010)84988395, qu-h@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“超临界二氧化碳在非正规油气藏中应用的基础研究”(编号:51034007)资助。

实现了一趟管柱进行 10 层段压裂,单个喷射工具加砂能力达到 50 m³。但是在筛管水平井多段压裂施工过程中存在砂卡管柱的风险,一定程度上限制了该技术的应用。笔者通过优化施工工艺,降低了筛管井管柱砂卡风险,并成功进行了现场试验。

1 水力喷射分段压裂机理

水力喷射分段压裂具有射流增压、射流封隔和降低起裂压力 3 种作用,三者有机结合,在没有井下机械封隔器情况下能够对筛管井进行压裂施工。

1.1 射流增压机理

高速射流进入射孔孔道后,由于孔道体积有限,射流速度会迅速衰减。根据伯努利原理,射流动能转化为液体静压能,增加孔内液体压力。由于射流增压效应的存在,孔道压力始终高于环空压力,所需环空压力低于筛管井眼中地层起裂压力,因此裂缝会优先在筛管水平井射流位置起裂^[7-9](水力喷射压裂机理如图 1 所示)。由此可知,孔内射流增压效应是实现筛管井定点分段压裂的重要机理之一。

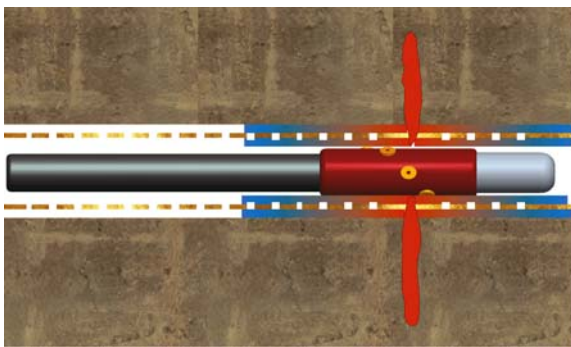


图 1 水力喷射压裂机理
Fig. 1 Hydrojet fracturing principle

1.2 射流封隔机理

裂缝在筛管井段起裂以后,喷嘴、环空、射孔孔道及裂缝所构成的喷射系统类似于一个射流泵,环空注入的高压流体会在高速射流作用下被卷吸进入裂缝,而不会流入井筒其他位置。因此,无需井下机械封隔设备,依靠射流即可实现封隔^[10],封隔机理如图 2 所示。

1.3 降低起裂压力机理

水力喷砂射孔在筛管井眼中形成的孔,孔道深,

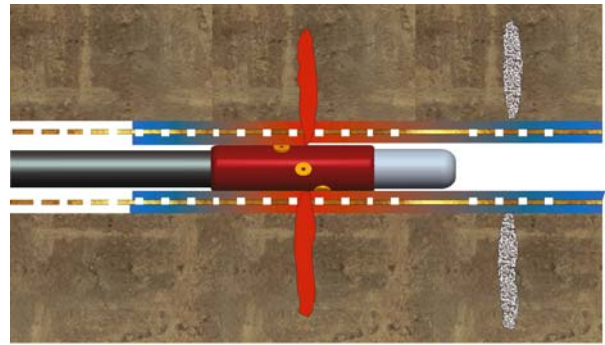


图 2 水力射流封隔机理
Fig. 2 The jetting seal principle

孔径大,没有压实带污染,可降低近井筒地带的应力集中,有利于沟通裂缝^[11-14]。此外,射流冲击及石英砂的磨削作用会使水力射孔孔道顶端产生众多微裂缝,微裂缝在一定程度上降低了地层起裂压力。因此,经水力喷砂射孔后,裂缝起裂压力将明显低于常规射孔地层起裂压力(见图 3)。

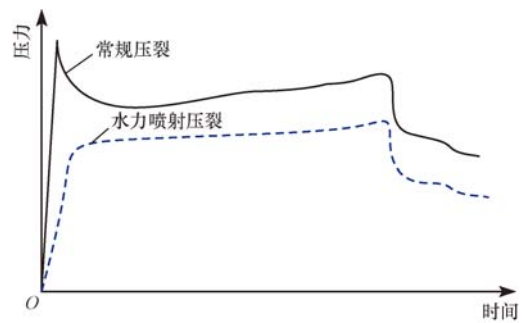


图 3 2 种压裂工艺起裂压力对比
Fig. 3 Comparison of the treatment pressures of two fracturing processes

2 井下工具串及施工工艺

2.1 井下工具串

根据施工工艺的不同,可选用拖动式井下工具或滑套式井下工具。其中,拖动式水力喷射工具由导向头、多孔管、单向阀、喷枪和稳定器等部分组成(见图 4)。喷枪本体上镶嵌有若干喷嘴,可根据施工排量要求来优化喷嘴直径、个数及相位,以实现单层加砂 50 m³ 的施工要求。

2.2 施工工艺

与井下压裂工具相对应,将拖动管柱式压裂工艺和不动管柱式压裂工艺相结合,具体施工工艺流程为:1)通过压裂管柱,将喷枪下至施工层位;2)向油管注入射孔液,进行水力喷砂射孔;3)关闭套管闸门,向油管注入前置液,向套管注入基液;4)阶梯式



图 4 拖动式水力喷射压裂工具结构

Fig. 4 Structure of jetting tool

1. 导向头; 2. 多孔管; 3. 下稳定器; 4. 单向阀; 5. 喷枪; 6. 上稳定器

加砂, 向油管泵注携砂液, 向套管注入基液; 5) 加砂完毕, 向油管和套管环空同时注入压裂液基液; 6) 停泵扩散压力, 待裂缝闭合; 7) 井口压力回零, 拖动管柱至下一压裂层段; 8) 投球, 打开第二级喷枪滑套; 9) 重复步骤 2) — 8), 施工后续层段。

3 现场应用

SA 井为一口水平井, 采用 $\phi 139.7$ mm 筛管完井。经过多次酸洗作业, 酸液返排率低, 抽汲排

液, 产油量 4~5 t/d。为提高储层渗流能力, 评价水平井产能, 决定采用水力喷射压裂技术进行压裂改造。

3.1 分段压裂施工

该水平井为筛管完井, 选择拖动式水力喷砂分段压裂技术。依据录井显示和测井解释结果, 考虑裂缝间的干扰并避开筛管接箍位置, 选择喷射点位置分别为井深 2 259.00, 2 121.00 和 2 007.00 m。施工曲线如图 5 所示。

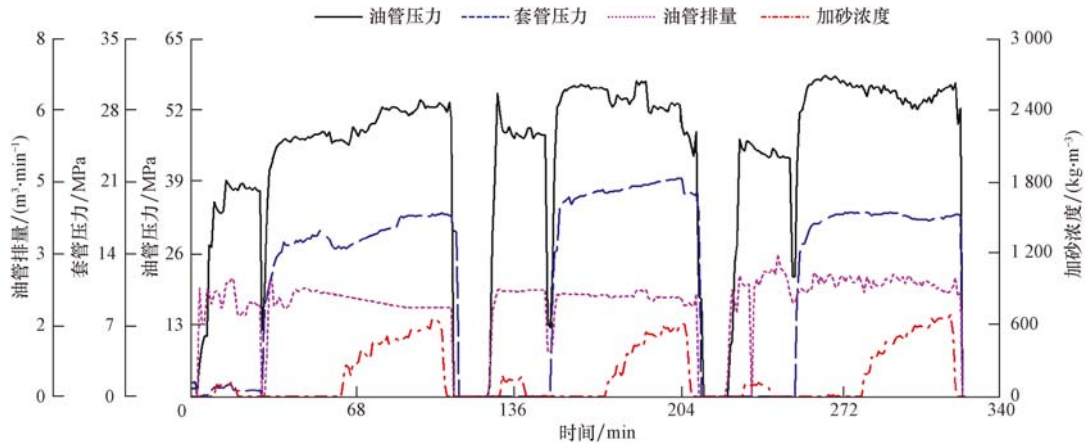


图 5 水力喷射分段压裂施工曲线

Fig. 5 The pressure curves of HJF

SA 井水力喷砂射孔阶段施工参数为: 油管排量 2.3~2.6 m³/min, 油压 39~46 MPa, 砂比 5%~8%, 连续射孔 15 min。喷砂射孔完成后, 关闭套管闸门, 向环空注入基液, 向油管注前置液, 此时套压趋于平稳, 说明地层顺利起裂。水力喷射压裂阶段施工参数为: 油管排量 2.3~2.6 m³/min, 油压 46~58 MPa, 套压 32~39 MPa, 3 层共计加砂 72 m³, 最高砂比 40%。加砂过程中油套压力基本不变, 说明缝高、缝宽控制得当, 施工顺利完成。

3.2 裂缝检测

对 SA 井水平段 3 个层段进行了压裂改造, 并配合地面裂缝检测。结果显示, 产生的 3 条裂缝均为北

东向裂缝, 与井眼轨迹方向几乎垂直(见图 6)。

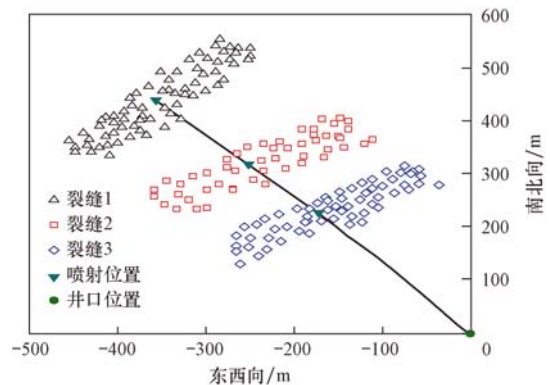


图 6 SA 井裂缝检测结果

Fig. 6 The results of fracture micro-seismic mapping

从图 6 可以看出,SA 井 3 次压裂产生的人工裂缝方位均为北东向,裂缝走向明显,证实了水力喷射分段压裂射流存在增压定点起裂及密封作用,实现了分段压裂目的。压裂设计支撑半缝长为 110~135 m,压裂得到的裂缝长度与设计长度符合较好(见表 1)。

表 1 SA 井压裂裂缝实时监测解释结果

Table 1 Fracture parameters of Well SA

压裂段 ¹⁾	缝长 ²⁾ /m	裂缝方位/(°)	裂缝高度/m
第一段	133.2/121.6	47.1	28.1
第二段	123.3/114.2	52.3	26.2
第三段	131.2/112.6	53.3	29.8

1) 压裂段第一段的喷射点为井深 2 259.00 m,第二段的喷射点为井深 2 121.00 m,第三段的喷射点为井深 2 007.00 m;
2) 为东西缝长。

3.3 压裂效果分析

由于在水平井筒产生的 3 条横向裂缝较大程度地沟通了储层,增加了泄油面积,该井投产初期产油量逐渐上升,产油量 36.8 t/d。转抽生产后,平均产油量 25.9 t/d,平均含水 4%。通过水力喷射分段压裂改造后,SA 井日产量显著提高,获得了良好的压裂效果。

4 结 论

1) 水力喷射分段压裂工艺利用射流封隔作用实现多段压裂改造。对于常规封隔器压裂工艺不适用的井(例如筛管井、已射孔井、套变井和小套管井等),依靠该工艺能够实现对油气井目的层段的有效分段改造,但存在一定的砂卡压裂管柱风险。

2) 对于压裂施工易砂卡井,将拖动式水力喷射分段压裂工艺与不动管柱式工艺相结合,能够对目的层实施多段压裂,并有效降低压裂管柱砂卡风险,实现压裂管柱下得去起得出。

3) 提高单级水力喷射分段压裂工具过砂量、增加工具压裂级数是该工艺的发展方向和重点,同时将该工艺与连续油管作业有机结合,将衍生出更多灵活而实用的压裂工艺。

参 考 文 献

References

[1] Surjaatmadja J B, Grundmann S R, McDaniel B W, et al. Hydrjet fracturing: an effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells[R]. SPE 48856, 1998.
[2] McDaniel B W, Surjaatmadja J B, East Loyd E Jr, et al. Use of

hydrjet perforating to improve fracturing success sees global expansion[R]. SPE 114695, 2008.
[3] Divesh C, Nuratas G, Colt A. Pinpoint-fracturing technology improves efficiencies while solving issues with conventional hydraulic-fracturing processes[R]. SPE 151559, 2012.
[4] 李宪文, 赵文珍. 水力射孔射流压裂工艺在长庆油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 67-70.
Li Xianwen, Zhao Wenzhen. Application of hydraulic perforation jet fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 67-70.
[5] Li Gensheng, Huang Zhongwei, Tian Shouceng, et al. Investigation and application of multistage hydrjet-fracturing in oil and gas well stimulation in China[R]. SPE 131152, 2010.
[6] 侯东红, 白建文, 刘雄明, 等. 水力喷射压裂改造技术在直井上的应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 42-44.
Hou Donghong, Bai Jianwen, Liu Xiongming, et al. Application of hydraulic jet fracturing technology in vertical wells[J]. Well Testing, 2009, 18(4): 42-44.
[7] Qu Hai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. The boosting mechanism and effects in cavity during hydrjet fracturing process[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(13): 1345-1350.
[8] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂孔道内部增压机理研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 73-75.
Qu Hai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Boosting mechanism in hydrjet-fracturing cavity[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(5): 73-75.
[9] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂孔内压力分布研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(4): 85-88.
Qu Hai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Jetting pressure field in formation cavities during hydrjet fracturing[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(4): 85-88.
[10] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射分段压裂密封机理研究[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 514-517.
Qu Hai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Sealing mechanism of the hydrjet stepwise fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 514-517.
[11] Li Gensheng, Niu Jilei, Song Jian, et al. Abrasive water jet perforation: an alternative approach to enhance oil production[J]. Petroleum Science and Technology, 2004, 22(5/6): 491-504.
[12] Tian Shouceng, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Investigation and application for multistage hydrjet-fracturing with coiled tubing[J]. Petroleum Science and Technology, 2009, 27(13): 1494-1502.
[13] 李根生, 牛继磊, 刘泽凯, 等. 水力喷射射孔机理试验研究[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.
[14] Huang Zhongwei, Niu Jilei, Li Gensheng, et al. Surface experiment of abrasive water jet perforation[J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(6): 726-733.