

筛管完井水平井梯度智能控堵水 试验研究

孟祥海¹ 朱立国² 张云宝¹ 高建崇¹ 代磊阳¹ 高立宁³ 邹明华²

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;
2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452;
3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司, 天津 300467

摘要:海上油田水平井多数采用筛管完井防砂,筛管与井壁之间存在轴向窜流,为解决水平井找水、分段控堵水难题,通过室内水平井控堵水模拟装置,开展基于电控阀控水管柱的梯度智能控堵水试验研究,分别测定筛管外环空化学封隔器(ACP)封隔强度、凝胶堵剂封堵率。结果表明:ACP每米环空抗压强度 $p > 2$ MPa,凝胶堵剂封堵率 f 为95.79%,封堵后,高、低渗透层出现“剖面反转现象”,使原来产液少的低渗透管分流量 Q 由封堵前的9%上升至80%,超过了高渗透管的产出,低渗透管得到了较好动用,说明梯度智能控堵水技术具有较好堵水效果。

关键词:水平井;筛管完井;电控阀;筛管外环空化学封隔器;凝胶堵剂;梯度智能控堵水

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.04.011

Experimental Studies on Stepwise and Intelligent WSO for Screen Completed Horizontal Well

Meng Xianghai¹, Zhu Liguang², Zhang Yunbao¹, Gao Jianchong¹, Dai Leiyang¹, Gao Lining³, Zou Minghua²

1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin, 300452, China;
2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Company, Tianjin, 300452, China;
3. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300467, China

Abstract: In order to solve the practical problem that it is difficult to find water and control water of most screen completed horizontal wells in offshore oilfield due to across flow between screen tube and reservoir, annulus chemical packer (ACP) and plugging agent are researched to form the technology of stepwise and intelligent WSO based on the technology of electronically controlled valves for water control. Experimental studies show that the pressure of ACP is more than 2 MPa/m in the external annular pressure simulation device of original size screen tube, the gel plugging rate reached 95.79% in high permeable tube by location injection of electronically controlled valves. The phenomenon of “profile inversion” appears in high and low permeability tube after plugging, which makes the diversion volume of low

收稿日期:2019-03-03

基金项目:国家科技重大专项基金“渤海油田高效采油工程及配套技术示范”(2016 ZX 05058-003);中海石油(中国)有限公司天津分公司科技项目“水平井机械与化学复合控水技术研究与应用”(CCL 2018 TJTLQST 0329)

作者简介:孟祥海(1976-),男,山东潍坊人,高级工程师,学士,主要从事采油工程技术与应用工作。

permeability tube with low fluid production increase from 9% to 80% , surpassing the production of high permeability tube. This indicates that low permeability tube has been well utilized and the stepwise and intelligent WSO has a good WSO effect.

Keywords: Horizontal well; Screen completion; Electronically controlled valves; Annulus chemical packer; Gel plugging agent; Stepwise and intelligent WSO

0 前言

水平井由于生产井段长、泄油面积大、单井产能高等优势^[1-4],近年来,逐步得到推广与应用,以渤海油田为例,现有水平井 888 口,对产量贡献超过 40%。这些水平井多采用砾石充填筛管完井方式进行防砂^[5-6],筛管与井壁之间存在 30 mm 左右的环空,存在轴向窜流,导致此类水平井在找水、分段堵水等方面难度较大^[7-9]。目前,水平井堵控水主要集中在智能找水开关井筒控水、基于桥塞的化学分段堵水、化学暂堵—强堵剂联合堵水、AICD 自动控水等技术研究^[10-16]。电控阀作为一种新型找控水工具,能够在地面通过控制柜、电缆对井下电控阀的开度进行无限调节,适用于射孔完井或存在筛管外封隔器的水平井,目前已在部分油田进行了先导性试验,取得了成功^[17],但该技术还不能解决筛管外无封隔器的水平井找控水问题。

本文针对上述问题,提出筛管完井水平井梯度智能控堵水技术,即:通过 ACP 对筛管外环空进行化学封隔,实现水平井筛管外分段^[18-19],在此基础上,通过电控阀找控水管柱,确定出水位置,然后根据生产需要,调整各段电控阀的开度,进而实现井筒控水目标,如果井筒控水效果理想,可按此制度进行生产,如果控水效果不理想或控水一段时间后效果变差,可打开对应出水段的水管封隔器,关闭其它段电控阀,将化学堵剂从电控阀注入出水地层,实施地层的定位深部封堵,进一步增强堵水效果^[20-21],进而实现梯度智能堵控水目标。室内试验研究表明:ACP 每米筛管外轴向封隔强度 $p > 2$ MPa,借助电控阀找控水管柱作为定位注入管柱,凝胶堵剂对高渗出水管封堵率 f 为 95.79%,封堵后,高、低渗透管出现“剖面反转现象”,低渗透管得到了较好动用。

1 试验条件

1.1 试验材料及条件

1.1.1 试验材料

管外化学封隔器 (ACP): 由中国石油勘探开发研究院提供,引发剂为过硫酸盐,实验室自备。

凝胶堵剂: 聚合物,有效含量 C_1 为 88%, 由北京恒聚化工集团有限责任公司提供,交联剂固含量 C_2 为 30%, 由山东丰泰化工科技有限公司提供。

陶粒: 由河南天祥新材料股份有限公司提供。

1.1.2 试验条件

试验用水: 渤海某平台注入水,矿化度 6 223 mg/L, 水型 NaHCO_3 型。

试验温度: 60 °C, 电加热带控制。

1.2 试验设备

全尺寸筛管外环空抗压模拟装置: 自主设计, 由天津万钧海洋工程技术有限公司试制。其中, 外管管径 $D_{\text{外}}$ 为 215.9 mm, 筛管管径 $D_{\text{筛}}$ 为 139.7 mm, 筛管缝宽 d 为 120 μm , 注入管管径 $D_{\text{注}}$ 为 73.00 mm, 模型有效长度 $L_{\text{模}}$ 为 1.5 m, 见图 1。

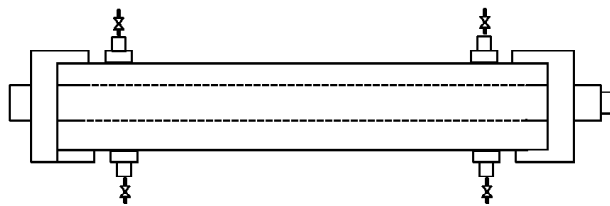


图 1 全尺寸筛管外环空抗压模拟装置示意图

其它设备: 氮气瓶 (出口压力 $p_{\text{出}}$ 为 ≤ 20 MPa)、中间容器 (容积 V 为 12 L)、填砂管 (端面通径 $d_{\text{端}} \times$ 长度 $L_{\text{管}} = 2.5 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$)、电加热套及配套管阀、平流泵 (waters 515 型)、电控阀 (自主设计)、简易膨胀式封隔器及配套液控管线 (自主设计)。

1.3 试验方案

1.3.1 ACP 筛管外封隔试验

ACP 筛管外封隔试验过程见图 2。

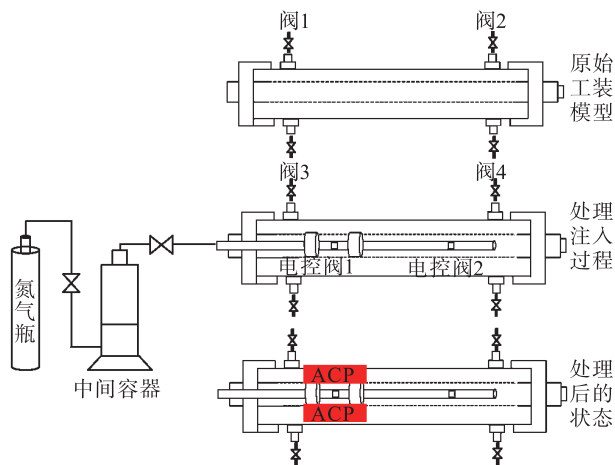


图 2 ACP 筛管外封隔试验过程图

- 1) 组装试压工装及验封, 确认工装合格。
- 2) 将筛管与外管之间的环空装入陶粒, 模拟砾石充填筛管完井。
- 3) 连接电控阀控堵水管柱, 并连同注入系统一起连入工装中, 调整开关, 确保电控阀 2 关闭, 电控阀 1 打开。
- 4) 依次将氮气瓶、盛有工作液的中间容器与电控阀控堵水管柱连接。
- 5) 按照 0.3% 的聚合物浓度配制 40 L 前置液。
- 6) 先将自来水、前置液依次通过注入装置, 对工装进行预处理至 4 个阀门均有水、前置液流出为止, 然后根据 50 cm 长 ACP 胶塞需要的药剂剂量, 将 14.95 L ACP 与 29.88 g 引发剂混匀后, 注入工装, 最后用平台水将电控阀控堵水管柱中的 ACP 驱替干净, 工装套上加热套, 设定温度 60 ℃, 保温 10 h, 待其固化, 待用。

1.3.2 定位注入堵剂试验

定位注入堵剂试验过程见图 3。

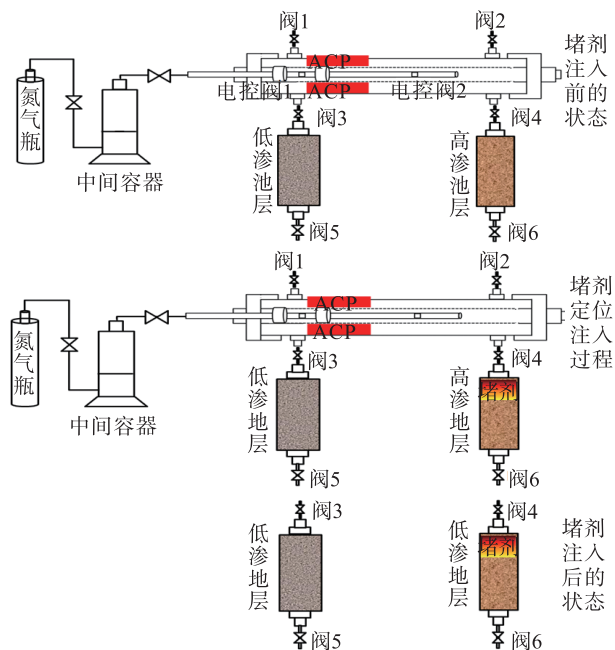


图 3 定位注入堵剂试验过程图

- 1) 取两根填砂管, 高渗透管水相渗透率 $K_{高}$ 为 $4.941 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、低渗透管水相渗透率 $K_{低}$ 为 $776 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 并用平台注入水、原油进行饱和, 模拟高、低渗透地层。按照并联方式, 进行水驱至产出液含水不变时, 停止水驱, 关闭前后阀门, 待用。
- 2) 调整电控阀控堵水管柱开关, 确保电控阀 1 关闭, 电控阀 2 打开。
- 3) 按照堵剂配方, 采用现场平台注入水配制凝胶堵剂。
- 4) 将阀 1、阀 2 连接压力表, 阀 3、阀 4 打开, 开始注入凝胶堵剂, 待阀 3、阀 4 见到凝胶堵剂后, 关闭阀门。
- 5) 将高、低渗透岩管按照图示位置, 连接到阀 4、

阀 3 上, 模拟高、低渗透地层, 将阀 3、阀 4、阀 5、阀 6 全部调至打开状态。

6) 采用电控阀控水管柱, 继续定位注入 4.51 mL 堵剂后, 关闭阀 3、阀 4、阀 5、阀 6。

7) 将高、低渗透管置于 60 ℃ 烘箱中, 保持 3 d, 待其成胶, 待用。

1.3.3 堵剂封堵测试试验

采用平流泵, 通过六通阀控制, 单独测试高、低渗透管封堵后的渗透率, 计算堵剂对高、低渗透管的封堵率, 同时, 测试封堵前后高、低渗透管的分流流量。

2 结果分析

2.1 ACP 筛管外封隔试验

关闭阀 1, 打开阀 2、阀 4, 采用试压泵与阀 3 连接, 进行注水, 对筛管外环空 50 cm 长度的 ACP 胶塞进行试压, 当压力 p 达到 1 MPa 时, 压力 5 min 保持不降, 阀 2、阀 4 没有刺漏现象, 说明 ACP 胶塞耐压 p 在 1 MPa 以上, 按理论计算, ACP 在砾石充填筛管完井水平井环空中轴向每米抗压强度 $p > 2 \text{ MPa}$ 。

对全尺寸筛管外环空抗压模拟装置进行切割, 截面见图 4。可以看出, 切割面整齐、完整, 说明 ACP 在砾石充填的筛管外环空中形成了坚硬的胶塞环。



图 4 ACP 管外环空封隔后的截面图

2.2 定位注入堵剂试验

将高、低渗透管依次接入阀 4、阀 3, 打开电控阀 2, 关闭电控阀 1, 实现堵剂对高渗透管的定位注入。阀 1、阀 2 对应压力见表 1。可以看出, 高渗段注入凝胶堵剂压力 $p_{凝胶}$ 为 0.5 MPa, 而低渗段没有压力显示, 说明 ACP 管外封隔效果好, 电控阀 1 完全关闭。电控阀控水管柱能够实现堵剂的定位注入。

表 1 堵剂注入过程中的压力变化

注入量 $Q_{注}/\text{mL}$	阀 1 处压力 $p_{阀1}/\text{MPa}$	阀 2 处压力 $p_{阀2}/\text{MPa}$
0	0	0
4.51	0	0.5

2.3 堵剂封堵测试试验

封堵率测试结果见表 2。高渗透管渗透率 $K_{高}$ 由封

堵前的 $4\,941 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至封堵后的 $208 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 封堵率为 95.79%, 低渗透管封堵前后渗透率基本保持不变, 说明电控阀控水管柱具有较好的定位注入效果, 并且进入高渗透管的凝胶堵剂起到了明显的封堵作用。

表 2 高、低渗透管的封堵率

渗透管		岩心管长 $L_{\text{管}}/\text{m}$	端面直径 $d_{\text{端}}/\text{m}$	注入排量 $V/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	注入压力 p/MPa	渗透率 $K/(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	封堵率 $f/(\%)$
高渗透管	封堵前	0.8	0.025	2	0.011	4 941	95.79
	封堵后	0.8	0.025	2	0.261	208	
低渗透管	封堵前	0.8	0.025	2	0.07	776	1.41
	封堵后	0.8	0.025	2	0.071	766	

高、低渗透管封堵前后的分流量见图 5。由图 5 可以看出, 封堵前, 91% 以上的产出液由高渗透管产出, 封堵后出现“产液剖面反转”现象, 即: 原来产液少的低渗透管产出也由封堵前的 9% 大幅上升至 80%, 超过了高渗透管的产出, 这种“产液剖面反转”现象促使了原来低渗透管得到更大程度的动用, 进而使采出程度得到有效提高。

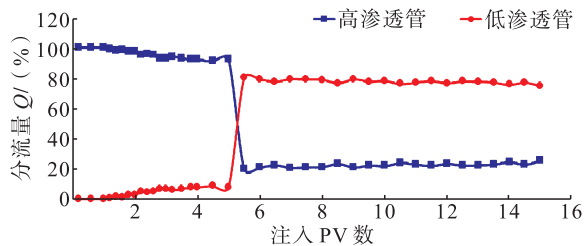


图 5 高、低渗透管封堵前后的分流量变化图

3 结论

1) ACP 具有较好的筛管外封隔作用, 电控阀具有找水、井筒控水功能, 还可以作为定位注入管柱, 进行定位化学堵水。

2) 基于 ACP、电控阀控水管柱、凝胶堵剂各自特点, 形成的梯度智能控堵水技术具有可行性, 该工艺具有找水、井筒控水、地层定位深部堵水的多重优点, 且可以根据实际措施效果, 梯度开展, 具有较强的可操作性。

参考文献:

[1] 袁 淋, 李晓平, 延懿晨. 底水油藏水平井临界产量确定新方法[J]. 天然气与石油, 2015, 33(1): 65-68.
Yuan Lin, Li Xiaoping, Yan Yichen. New Method for Determination of Horizontal Well Critical Output in Bottom-Water Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (1): 65-68.

[2] 屈亚光, 安桂荣, 周文胜, 等. 底水油藏水平井开发效果影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(12): 3406-3409.
Qu Yaguang, An Guirong, Zhou Wensheng, et al. The

Analysis of Influencing Factors on Development of Horizontal Wells in Bottom Water Drive Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (12): 3406-3409.

[3] 李传亮, 朱苏阳, 柴改建, 等. 直井与水平井的产能对比[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 12-16.
Li Chuanliang, Zhu Suyang, Chai Gaijian, et al. Comparison of Productivity of Vertical Wells with Horizontal Wells [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30 (3): 12-16.

[4] 周代余, 江同文, 冯积累, 等. 底水油藏水平井水淹动态和水淹模式研究[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 73-77.
Zhou Daiyu, Jiang Tongwen, Feng Jilei, et al. Waterflooding Performance and Pattern in Horizontal Well with Bottom Water Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25 (6): 73-77.

[5] 史 进. 疏松砂岩水平井分段筛管完井研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(23): 42-45.
Shi Jin. Research of Partial Screen Completion for Horizontal Well on Unconsolidated Sandstone [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14 (23): 42-45.

[6] 龙 明, 何新容, 王美楠, 等. 渤海底水油藏水平井合理生产能力研究[J]. 天然气与石油, 2018, 36(4): 79-85.
Long Ming, He Xinrong, Wang Meinan, et al. Study on Reasonable Productivity of Horizontal Wells in Reservoirs with Bottom Water of Bohai Oilfield [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 79-85.

[7] 张厚青, 刘 冰, 徐兴平, 等. 底水油藏水平井最优避水高度及合理长度的研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(4): 774-778.
Zhang Houqing, Liu Bing, Xu Xingping, et al. Studies of the Optimum Water Avoidance Height and the Reasonable Length of Horizontal Well in Bottom Water Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12 (4): 774-778.

[8] 朱立国, 王秀平, 黄晓东, 等. 渤海底水油藏水平井分段堵水室内实验研究[J]. 石油化工应用, 2015, 34(3): 41-43.
Zhu Liguang, Wang Xiuping, Huang Xiaodong, et al. The Experimental Study of Single Location WSO of Screen Completed Horizontal Wells in Bohai Oilfield [J].

- Petrochemical Industry Application, 2015, 34 (3): 41-43.
- [9] 于蓬勃. 底水稠油藏水平井水特征及影响因素[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 36-40.
- Yu Pengbo. Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Heavy Oil Reservoir with Bottom Water [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 36-40.
- [10] 魏发林, 刘玉章, 李宜坤, 等. 割缝衬管水平井堵水技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(1): 40-43.
- Wei Falin, Liu Yuzhang, Li Yikun, et al. Developing Trend and Current Situation of Water Plugging Technology for Slotted Pipe Horizontal Wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29 (1): 40-43.
- [11] 张国文, 任家萍, 张卫平, 等. 水平井筛管完井找堵水工艺技术研究[J]. 石油机械, 2012, 40(12): 10-12.
- Zhang Guowen, Ren Jiaping, Zhang Weiping, et al. Research on the Technology of WDP for Horizontal Screen Completion [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40 (12): 10-12.
- [12] 甄宝生. 井下智能找水、堵水技术在渤海油田水平井中的应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 56-57.
- Zhen Baosheng. Application of Intelligent Water Zone Identification and Water Shut-Off in Horizontal Wells in Bohai Offshore Oilfield [J]. Well Testing, 2016, 25 (4): 56-57.
- [13] 赵吉成. 辽河油田稠油藏筛管完井水平井分段化学堵水技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(6): 90-93.
- Zhao Jicheng. Staged Chemical Water Plugging for Horizontal Wells with Screen Completions for Heavy Oil Reservoirs in Liaohe Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36 (6): 90-93.
- [14] 闫海俊, 胡书宝, 谢刚, 等. 基于改性氰凝的水平井定点堵水技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 98-102.
- Yan Haijun, Hu Shubao, Xie Gang, et al. Fixed-Point Water Shutoff Technology in Horizontal Wells Based on Modified Cyanogen Coagulation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46 (2): 98-102.
- [15] 杜勇. 底水油藏水平井配套暂堵实现强凝胶堵水技术研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 51-53.
- Du Yong. Study on Water Plugging with Temporary Blocking Plus Strong Gel for Horizontal Wells in Bottom Water Reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40 (1): 51-53.
- [16] 高智梁, 郑旭, 任宜伟, 等. 海上X油田水平井智能分采管柱卡堵水潜力井筛选及应用效果分析[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 88-91.
- Gao Zhiliang, Zheng Xu, Ren Yiwei, et al. Selection of Potential Wells for Water Plugging by Using Intelligent Separate-Production Strings in Horizontal Wells in X Offshore Oilfield and Its Application Effect [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39 (1): 88-91.
- [17] 左立娜. 应用电控配产技术控制无效循环[J]. 石油石化节能, 2018, 8(5): 32-35.
- Zuo Lina. Control of Invalid Cycle by Using Electronic Control and Production Technology [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2018, 8 (5): 32-35.
- [18] 周赵川, 陈立群, 高尚, 等. CESP水平井环空化学封堵工艺在渤海油田的应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(3): 400-402.
- Zhou Zhaochuan, Chen Liqun, Gao Shang, et al. Application of Annulus Chemical Plugging for Horizontal Well with CESP Screen Pipe in Bohai Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20 (3): 400-402.
- [19] 商乃德, 邹明华, 魏发林, 等. 水平井环空化学封隔材料——MMH/MT/AM体系的流变性能研究[J]. 油田化学, 2016, 33(4): 589-593.
- Shang Naide, Zou Minghua, Wei Falin, et al. Rheological Properties of an Annular Chemical Plugging Materials——MMH/MT/AM System for Horizontal Wells [J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33 (4): 589-593.
- [20] 贾虎, 蒲万芬. 有机凝胶控水及堵水技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 141-149.
- Jia Hu, Pu Wanfen. Research on Water Control and Water Shutoff Technologies of Organic-Gel [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35 (6): 141-149.
- [21] 陈曦, 谭国锋. 油田堵水复合铝凝胶制备及性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2012, 13(2): 8-11.
- Chen Xi, Tan Guofeng. Preparation of and Performance Evaluation on Composite Alumina Gel for Oilfield Water Shutoff Application [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2012, 13 (2): 8-11.