



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2023.04.06.04

文章编号: 1674-5086(2025)02-0105-10

中图分类号: TE53

文献标志码: A

裂缝性底水稠油油藏水平井 AICD 控水技术研究

杨勇*, 孙常伟, 江任开, 李小东, 刘远志

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000

摘要: 裂缝性底水稠油油藏微裂缝发育、原油黏度高、含水上升快, 常规水平井开发难以确保开发效果, 水平井控水开采此类底水能力强的油藏一直是开发主攻方向。南海 L 油藏为该类的典型, 投产二十多年, 采出程度不到 12%, 而综合含水已达 96% 以上。高角度裂缝发育是油田底水快速上升、开发效果差的主要原因, 同时储层基质中的原油难以得到有效动用, 大量剩余油仍存在于基质与孤立的溶孔溶洞中。历史增产措施采用化学堵水、常规 ICD 控水等技术效果较差。通过分析 AICD 控水技术的机理, 结合物理模拟、数值模拟以及现场实际应用情况研究了其适用性, 认为 AICD 技术能够提高该类油藏水平井有效生产井段的生产, 进而改善开发效果。通过矿场选井评价了 AICD 可以利用其机理自主抑制微裂缝高渗带流量, 均衡水平井供液剖面, 提高水平井波及系数, 从而达到增加有效井控储量的控水增油目的, 具有较好的推广应用价值。

关键词: 裂缝; 底水; 稠油; AICD 控水; 控水增油

Mechanism and Applicability of AICD Water Control in Fractured Bottom Water Heavy Oil Reservoir

YANG Yong*, SUN Changwei, JIANG Renkai, LI Xiaodong, LIU Yuanzhi

CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract: Fractured bottom water heavy oil reservoir is the characteristic of micro-fracture development, high viscosity of crude oil and rapid rise of water cut. It is difficult to ensure the development effect by conventional horizontal well development. The development of such reservoir with strong bottom water control ability by horizontal well is always the main direction of development. Nanhai L Reservoir is a typical reservoir of this type. And has been put into production for more than 20 a, with recovery less than 12%, and comprehensive water cut more than 96%. The results of chemical water plugging and conventional ICD water control are poor. The development of high angle fractures is the main reason for the rapid rise of oilfield bottom water and poor development effect. At the same time, the crude oil in the reservoir matrix is difficult to be effectively used, and a large number of remaining oil still exists in the matrix and isolated karst caves. We analyze the mechanism of AICD water control, studies its applicability in combination with physical model, numerical model and field application, and conclude that AICD technology can improve the production of effective production intervals of horizontal wells in this kind of reservoir, and thus improve the development effect. According to the evaluation of well selection, AICD is a mechanism of controlling water and increasing oil production by controlling the flow of micro fracture and high permeability zone independently, balancing the liquid supply profile of horizontal well, improving the sweep efficiency of horizontal well and increasing the effective well control reserves.

Keywords: fracture; bottom water; heavy oil; AICD water control; water control and improve oil

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20250328.1514.006>

杨勇, 孙常伟, 江任开, 等. 裂缝性底水稠油油藏水平井 AICD 控水技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 105-114.

YANG Yong, SUN Changwei, JIANG Renkai, et al. Mechanism and Applicability of AICD Water Control in Fractured Bottom Water Heavy Oil Reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(2): 105-114.

* 收稿日期: 2023-04-06 网络出版时间: 2025-03-31

通信作者: 杨勇, E-mail: yangyong7@cnooc.com.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05052003)

引言

L 油藏位于南海珠江口盆地,为生物礁滩裂缝性底水稠油油藏,内部断层、微裂缝(溶洞)发育,是在基岩隆起上发育起来的生物礁滩—背斜构造,构造主体相对平缓,整体呈西高东低的趋势^[1-2]。油藏厚度 87.0 m、具有统一油水界面,探明储量大,礁灰岩基质系统储量占 99%,仅 1% 存储在裂缝中。目前,油田采出程度 12%,规划产量高,提产需求迫切。油田加密调整后,调整井生产情况较差,投产即高含水,平均单井累产油仅为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前,油田综合含水已达 96% 以上。针对该油藏的出水问题,已经尝试了较多的控水方法,均无效果,更无法做到长期有效^[3-4]。

针对控水问题,学者们做了不少研究。徐国民等为提高裂缝性储层的调剖效果,在室内研究了一种以水泥为主要材料的裂缝性化学堵水技术^[5]。龙秋莲等在裂缝性稠油油田现场采用聚合物交联凝胶体系进行选择封堵水层,获得了显著降水增油效果^[6]。陶红胜等就低渗透油藏注入水突进及沿裂缝水窜的实际问题提出了一种体膨胀选择性堵水剂的堵水方法^[7]。

罗启源等针对南海珠江口盆地的疏松砂岩底水油藏在利用水平井开发时出现的油井出砂和过早、过快见水问题,提出了利用流入控制装置(Inflow Control Device, ICD)来进行完井的方案^[8-9],但在实际投产过程中 ICD 仅能控制初期含水上升并对油井产能具有副作用,降低了高含水期单井产量。自适应流入控制装置(Autonomous Inflow Control Device, AICD)具有根据井下工况调节自身阻力等级的能力^[10-11]。

目前,国际上主流的几种装置分别是:挪威石油公司的 RCP、哈里伯顿公司的 EquiFlow AICD、

贝克休斯的 Counterweight Flapper ICD 以及汉森能源解决方案开发的 BECH 自适应流入控制装置。阳明君等通过研究伯努利方程并在水力软件里面模拟不同相自动控制的界限,优化设计参数,实现对流体黏度及密度敏感的稳油控水阀,形成多级限流、膨胀材料等多种新型 AICD 控水装置^[10-15]。新型的 AICD 装置无须人工干预,也无须液压或者电力系统即可自行调节,能够有效提高油井产量。

分析控水新技术表明,AICD 控水装置通过油水黏度差异控制全水平段的均衡产出。虽然增加了流体向井流动阻力,但高含水段增加的阻力远远大于低含水段增加的流动阻力,具有阻碍高含水段的产出、抑制底水突进、延长无水采油期等优势。目前,针对裂缝性底水稠油油藏特高含水期油水流量差异较大的 AICD 控水技术在国内还没有推广应用^[16]。

1 裂缝性底水稠油油藏水平井 AICD 控水机理

AICD 主要作用是在无须人工干预和提供电(液)动力的情况下,可自主改变结构内部的流动面积,起到“节流”低黏度流体、“开源”高黏度流体的作用。与传统 ICD 相比,AICD 除了延缓水气突破之外,还能降低突破流体在产出液中所占的比例,从而使得油井保持高效生产^[17-18]。

1.1 水平井 AICD 控水管柱结构工艺特点

参考常规控水管柱,裂缝性底水稠油油藏水平井 AICD 控水管柱与常规普通筛管完井管柱基本相同,由封隔器、尾管挂、盲管、筛管串、引鞋构成(图1);不同的是筛管串由基管、AICD 限流阀、过滤筛网、筛网保护套组成,AICD 限流阀均匀安装在基管上。

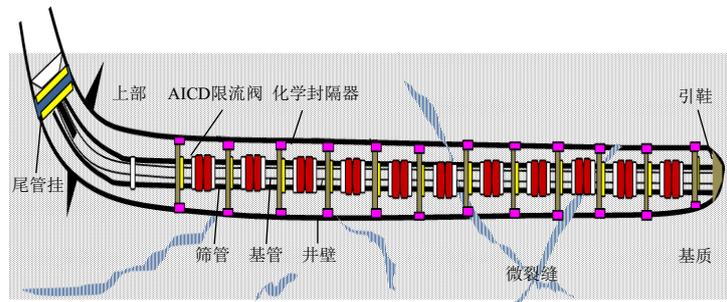


图1 水平井下部完井管柱 AICD 控水装置示意图

Fig. 1 AICD water-control device in lower completion pipe string of horizontal well

1.2 裂缝性底水稠油油藏 AICD 控水机理

L 油藏三维地震解释及随钻测井的井震资料分析, 一般礁灰岩油藏发育微裂缝及溶蚀孔洞^[19-22]。裂缝性底水稠油油藏在开发过程中, 微裂缝或溶蚀

孔洞作为更好的优势渗流通道将底水和井筒连通。微裂缝发育的井控区域波及系数低、采出程度低, 同时基质具有亲油-强亲油特性, 导致基质向裂缝窜流少, 双重介质特征明显(图 2)。

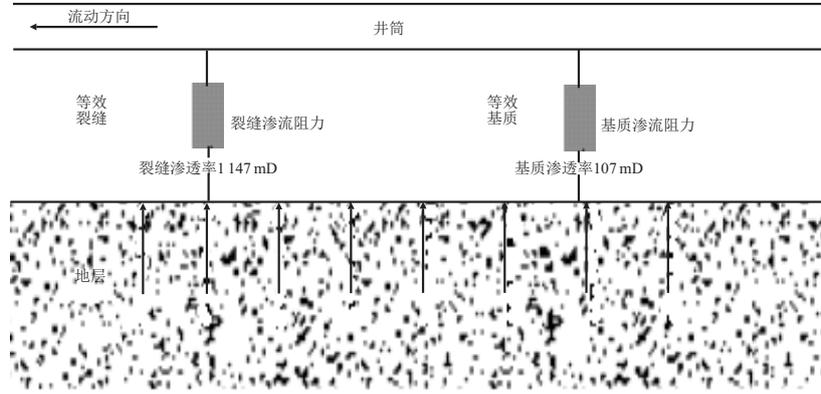


图 2 裂缝性双重介质油藏井筒流动示意图

Fig. 2 Diagrammatic wellbore flow of dual porous fractured reservoir

L 油藏地层原油密度 0.936 g/cm^3 , 黏度 $52\sim 125 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 属于高密度高黏度底水稠油油藏。这使得开发过程中出现油水流量比差异大, 底水上升快, 水锥特征明显, 井筒局部水淹后期加密井井控储量 大而采出程度低的情况。

为了研究裂缝性底水油藏裂缝及基质对井筒流量贡献, 需明确渗流阻力中 AICD 抑制液量情况和基质与裂缝对应均衡流场的关系。

根据伯努利公式, 均衡流场 AICD 控水阀对应的流量与压差关系为

$$p_{\text{fracture}} + \frac{1}{2}\rho v^2_{\text{fracture}} + \Delta p_{\text{AICDfracfriction}} = p_{\text{matrix}} + \frac{1}{2}\rho v^2_{\text{matrix}} + \Delta p_{\text{AICDmatfriction}} \quad (1)$$

据文献资料, AICD 装置附加压降与流体黏度、密度参数相关, 与过流量呈幂指数关系^[23]

$$\Delta p_{\text{AICDfracfriction}} = f \alpha_{\text{AICD}} q^b \quad (2)$$

当井筒见水后, 井筒附近区域为两相渗透区

$$f = \left(\frac{\rho_{\text{mix}}^2}{\rho_i} \right) \left(\frac{\mu_{\text{mix}}^2}{\mu_i} \right) y \quad (3)$$

混合密度和混合黏度中的混合系数, 可以通过矿场试验结果得到

$$\rho_{\text{mix}} = \sigma_o \rho_o + \sigma_w \rho_w \quad (4)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \omega_o \mu_o + \omega_w \mu_w \quad (5)$$

根据 Buckley-Leverett 水驱油前缘驱动方程式, 考虑基质和裂缝渗流阻力, 建立 AICD 装置附加压降的基本水驱油理论公式

$$Q = \frac{KA\Delta p}{\int_0^{x_f} \frac{\mu_o \mu_w}{K_{ro} \mu_w + K_{rw} \mu_o} dx + \mu_o(L - x_f)} = \frac{p_e - p_w - \Delta p_{\text{AICDfracfriction}}}{R} \quad (6)$$

已知裂缝和基质渗透率及油水相渗参数, 裂缝和基质渗流阻力可分别表示为

$$R_{\text{fracture}} = \frac{\int_0^{x_f} \frac{\mu_o \mu_w}{K_{ro} \mu_w + K_{rw} \mu_o} dx + \mu_o(L - x_f)}{AK_{\text{fracture}}} \quad (7)$$

$$R_{\text{matrix}} = \frac{\int_0^{x_f} \frac{\mu_o \mu_w}{K_{ro} \mu_w + K_{rw} \mu_o} dx + \mu_o(L - x_f)}{AK_{\text{matrix}}} \quad (8)$$

根据 L 油藏基础参数(表 1)及相渗曲线(图 3), 计算得到裂缝渗透阻力约为基质渗透阻力的十分之一, 根据伯努利方程 AICD 对于裂缝和基质流量一致情况下, 对于裂缝的附加压降随着不同流速变化, 在 $9 \text{ m}^3/\text{h}$ 情况下裂缝和基质附加压降比值达到 12.7。研究表明, AICD 控水裂缝性底水稠油油藏的机理为: 组合 AICD 控水阀、物理分隔不同井段, 使得已水淹或含水高的高渗带进入井筒附加压降增大从而主动抑制该井段流量, 保证了低含水基质井段采出的生产压差, 从而提高了低含水段动用程度, 均衡了水平井近井地带流场供液剖面, 提高了水平井波及系数, 增加了有效井控储量。

表 1 油藏基础参数
Tab. 1 Basic parameters of the reservoir

厚度/m	孔隙度/%	基质渗透率/D	裂缝渗透率/D	原始地层压力/MPa	地层原油黏度/(mPa·s)	原油密度/(g·cm ⁻³)	水平段长度/m
54	26	0.236	1.857	12.8	53.9	0.936	800

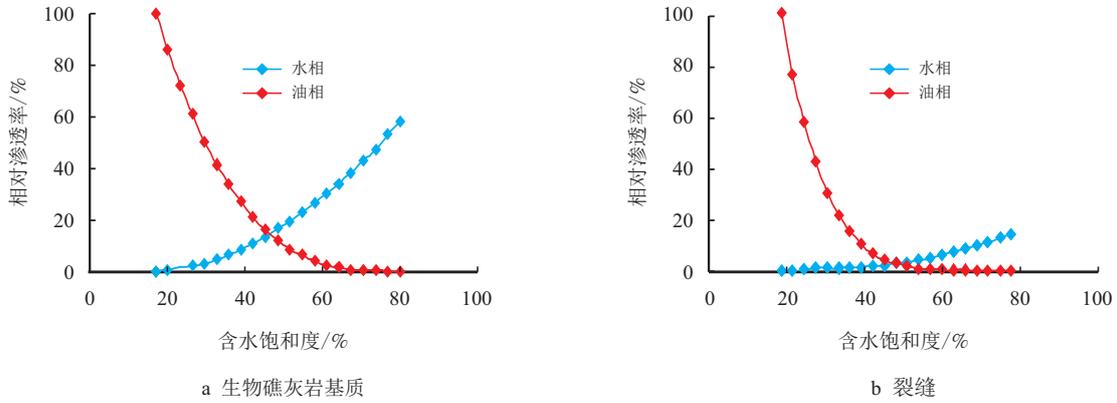


图 3 生物礁灰岩基质与裂缝相对渗透率曲线
Fig. 3 Relative permeability curve of biohermal limestone

2 裂缝性底水稠油油藏水平井 AICD 控水适用性研究

在分析了 AICD 控水增油机理的基础上,为了进一步研究 AICD 对于裂缝性底水稠油油藏水平井的控水适应性,分别设计、完成了物理模拟实验和数值模拟研究。

2.1 物理模拟适用性研究

为了研究 AICD 水平井开发过程,直接观察沿水平段过程压力分布、流量分布及窜流分析等状况,研究底水油藏水平井 AICD 装置与附加压降的关系,评价 AICD 在礁灰岩底水油藏适用性,设计了物理模拟实验装置(图 4),模拟了井筒中组装 10 个碟片式 AICD 筛管的生产情况。

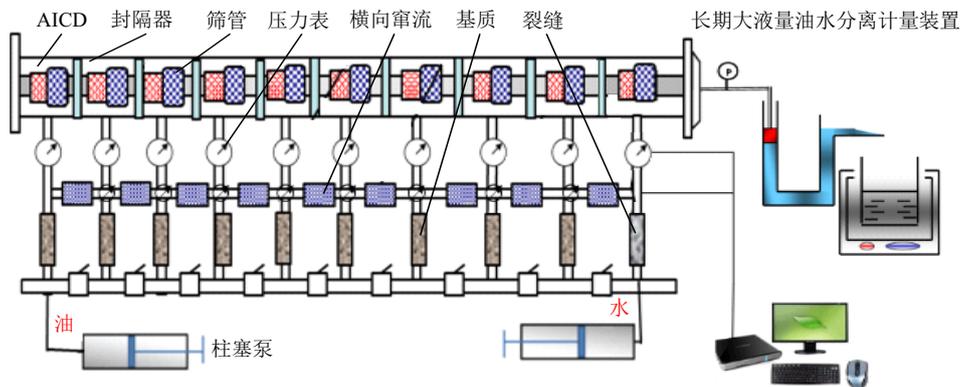


图 4 AICD 控水生产压差与流量实验装置图
Fig. 4 Experimental device for production pressure drop-down and flow rate monitor with AICD water-control device

模拟中,该底水油藏水平井碟片式 AICD 控水沿程压力流量分布模型用于模拟裂缝性礁灰岩碟片式 AICD 水平井开发。物理模拟评价实验模拟井筒中组装 10 个碟片式 AICD 筛管的生产情况(图 4),采用 1 个填满石英砂的填砂管模拟礁灰岩裂缝,9 个灰岩露头模拟礁灰岩基质。用地层与地层之间的 9 个填满石英的填砂管来模拟地层之间的轴向窜

流。该物理模型结构包括压力传感器、地层水中间容器、压力传感器、恒速驱替泵、长期大液量油水分离计量装置、管线、立体模型和计算机,其中立体模型左右两侧各有一个恒速驱替泵向立体模型底部注入地层水及模拟油以模拟底水及饱和油,模型中间为充填露头灰岩及石英砂管,模型上部有一口模拟 AICD 水平井,可透过立体模型前边压力表和流量

表观察压力、流量及窜流分布情况, 立体模型边部配有高精度压力采集传感系统与计算机直接相连, 可直接将压力、流量数据传输至计算机自动采集, 水平井产液由量筒计量。实验分为两组, 一组研究原油不同含水混合液通过 AICD 控水阀过流量与附加压降关系; 一组研究沿程压力、流量及窜流分布情况。水样按照地层水矿物成分进行配比, 油样取自 L 油藏井口并按照地层黏度进行配比, 配比黏度 106 mPa·s, 记录原油在含水率 20%、50%、80% 和 98% 时的生产压差。装置中压力表用于监测 AICD 控水方式上的压降, 横向窜流的流量表用于监测裂缝与基质窜流情况。

实验结果显示, 在底水油藏水平井开发过程中, 由于重力、储层性质等因素的影响, 油藏中沿井轴方向会产生水体脊进现象, 近井筒裂缝和基质渗流阻力差异计算 AICD 对裂缝和基质的附加压降。通过建立基质与裂缝窜流横向油藏 AICD 控水水平

井沿程模型, 不同水平段压力和流量分布, 如图 5 所示。

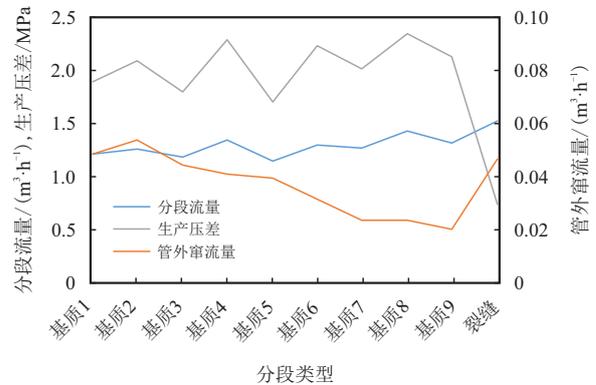


图 5 沿水平井筒分段流量、压力与管外窜流量
Fig. 5 Staged flow rate, pressure and flow rate of the outside channeling along with the horizontal wellbore

油和水在相同附加压降的情况下, 纯油流量为水的 8~12 倍。在附加压降 2 MPa 时对应水和油流量分别为 0.285 和 2.180 m³/h, 如图 6 所示。

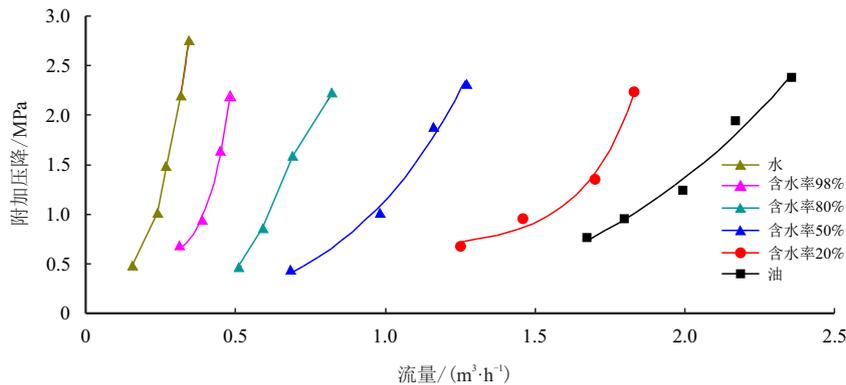


图 6 过 AICD 不同流量下附加压降
Fig. 6 The additional pressure drop of different flow rate through AICD

模拟 AICD 筛管在不同含水阶段的附加压降表明, 在投产初期纯产油时, 流量与附加压降几乎成线性关系, 油的采出受影响; 当含水达 50%~80% 时, AICD 筛管附加压降开始比较明显, 随着压降增大, 流量并不是线性增大, 而是有一定限制; 而到了

含水超过 80% 时, 与纯水差异不大。由实验结果分析认为应该在油井含水 50%~80% 时应用 AICD 控水较为有利。

2.2 数值模拟适用性研究

设计了 AICD 数值模拟适用性方案, 见表 2。

表 2 AICD 数值模拟适用性设计方案及预测对比表

Tab. 2 AICD applicability numerical simulation program design and forecast comparison

模拟方案	完井方式	水平段长/m	AICD 控水技术			模型预测		
			有无 AICD	分段数/段	AICD 控水阀数/个	预测累产油/(10 ⁴ m ³)	含水率/%	预测累产增油/(10 ⁴ m ³)
初始方案	裸眼	800				27.08	92.1	
AICD 方案 1	AICD 筛管	800	有	10	78	36.82	81.5	9.74
AICD 方案 2	AICD 筛管	800	有	8	98	35.11	81.9	8.03
AICD 方案 3	AICD 筛管	800	有	4	98	34.71	83.2	7.63

利用 L 油田实际资料, 先建立了双重介质的理论模型, 模拟裸眼下入 AICD, 在 AICD 间加封隔

器, 减少管外窜流, 其数值模拟 AICD 控水工艺技术如图 7 所示。

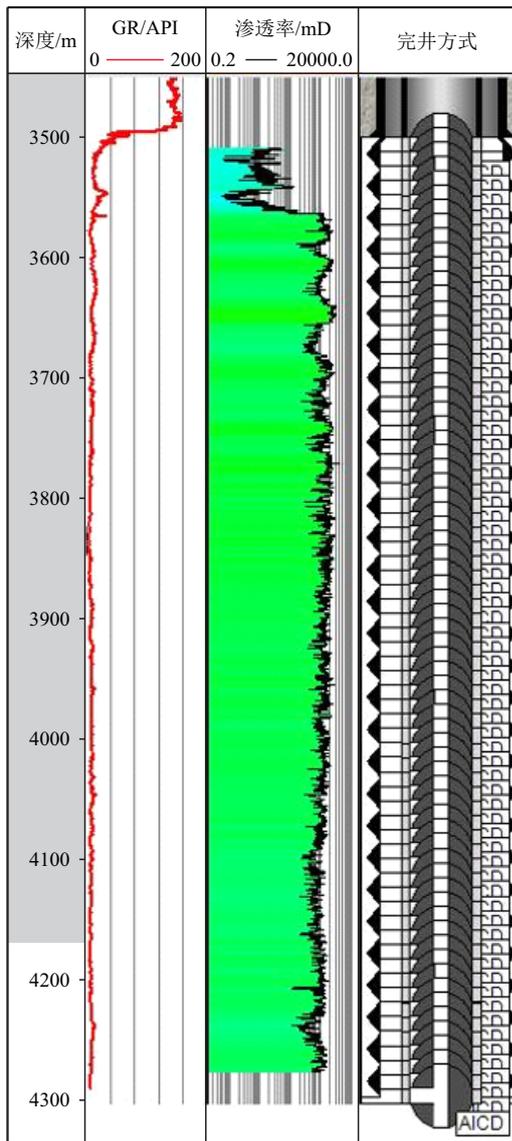


图 7 数值模拟 AICD 控水工艺技术
Fig. 7 Numerical simulation of AICD water-control technology

模拟过程为选取一口水平井进行模拟, 根据水平段轨迹及渗透率分布布置 AICD 筛管, 按表 2 设计的 4 套对比方案, 其中: 1) 裸眼完井, 设计水平段长 800 m; 2) 碟片形 AICD 进行控水。利用管外封隔器把水平段分作 4 段, 根据下入 AICD 控水阀 80 个。油井定产量生产, 设计最大液量 2 385 m³/d, 预计生产寿命 6 a。

在模拟时, 近井地带通过网格加密重新定义油水渗透系数及相渗特征, 用多条高渗带来等效天然微裂缝。模拟结果如图 8 所示, AICD 控水和裸眼累产油分别为 34.71×10⁴ m³ 和 27.08×10⁴ m³, 增油量 7.63×10⁴ m³。预测单井累计增油量提高 28%, 含水率降低 9%。

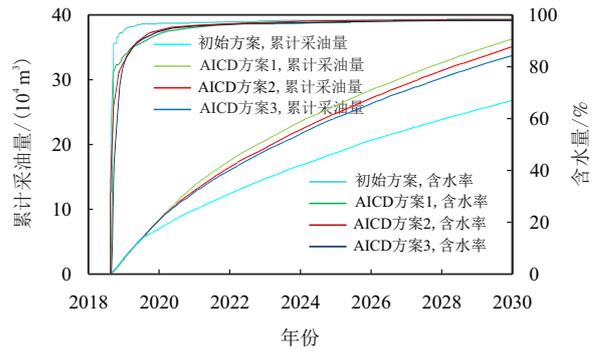


图 8 AICD 数值模拟适用性方案预测对比
Fig. 8 Comparison of AICD applicability numerical simulation program forecast

3 矿场应用

近 10 年来, L 油藏调整井共计 8 口, 调整井皆为加密井, 总体开采效果差, 调整井平均单井累计产油低于 10×10⁴ m³。历史采取多种增产措施, 包括酸化、多分支和化学堵水等。措施后效果不达预期, 净增油多数为负, LFG 措施有初步效果。对比而言, AICD 控水增油较为明显(表 3)。

2010 年, 在 L 油藏主区西北部选择 B1 井进行化学堵水增产措施, 该井水平段长 820.5 m, 根据该井地质特征, 并从含油饱和度分布图各小层剩余油分布看, B1 井水平段根部已高含水, 剩余油相对较少, 结合实际生产情况, 堵水井段确定为 2 280~2 433 m(长 153 m, 储层物性较好且连续)及尾段 3 028~3 048 m(长 20 m), 共 173 m, 选择堵剂为 HLC-1 木质素磺酸盐堵剂, 采用笼统注入的方式。从 B1 井堵水前后生产数据可以看出堵水效果不理想。施工过程中出现堵剂早凝现象, 堵后生产马达温度升高, 返排出杂质。对比堵水前后生产数据, 日产油减少 26%, 日产液量减少 35% 左右, 含水变化不大, 下降 0.3%(表 4)。

L 油藏在 2013 年探索应用 ICD 控水技术, 实施侧钻调整井 B4H2 井, 水平段储层孔隙度 27%, 含油饱和度 60%, 钻遇 53 条高角度裂缝和 5 条断层, 依据水平井段储层物性、裂缝发育情况下入 24 个 ICD, 投产初日产油量 190 m³ 低于设计(192 m³), 日产液 1 147 m³, 初始含水率 83.5%, 后升至 95.0%; 该井与邻井储层物性和含油性相当, 但离原始油水界面更近, 钻遇裂缝更多, 但从两口井累产油与含水率关系图看出, 井筒内下有 ICD 装置的 B4H2 井生产效果比 A4H4 要好些, 但还未达到预期的效果。

表 3 历史措施前后动态数据对比

Tab. 3 Dynamic data comparison of the before and afterward EOR methods carried out

措施类型	井号	措施时间	措施前			措施后		
			日产液/m ³	日产油/m ³	含水率/%	日产液/m ³	日产油/m ³	含水率/%
化学堵水	B1	2012-05	1 745	58	96.6	870	35	96.0
酸化	A1	2013-02	387	50	87.1	383	39	89.7
酸化	A2	2008-11	142	139	2.2	210	44	93.4
酸化	A3	2013-01	348	42	88.0	292	55	81.2
多分支	M1	2013-11	343	30	91.3	490	39	92.0
ICD 控水	D1	2013-09	1 438	51	96.5	1 161	61	94.6
ICD 控水	D2	2014-05				555	40	92.9
LFG	B2	2017-01	1 976	11	99.0	2 046	35	98.0

表 4 近井筒化学堵水前后动态对比

Tab. 4 Dynamic data comparison of before and afterward the near wellbore chemical water plugging

类型	日期	日产油/m ³	日产水/m ³	日产液/m ³	含水率/%
堵水前	2010-02-21	43.248	1 286.310	1 329.558	96.6
堵水后	2010-03-15	37.047	766.380	803.427	95.2
堵水后	2010-03-21	27.030	821.235	848.265	96.7
堵水后	2010-03-25	31.323	912.342	943.665	96.5

C 井位于 L 油藏构造边部, 水平段总长 820 m。该井于 2015 年 8 月投产, 最新测试日产液 1 759.1 m³, 日产油 74.8 m³, 综合含水 95.7%, 生产压差 1.9 MPa。水平段末端由于钻遇小断层存在漏失, 后采用两个膨胀封隔器进行堵漏, 漏失速率从 72.7 m³/h 降至 5.2 m³/h, 实际生产含水上快, 如图 9 所示。L 油藏 C 井沿井筒 AICD 布置见图 10。

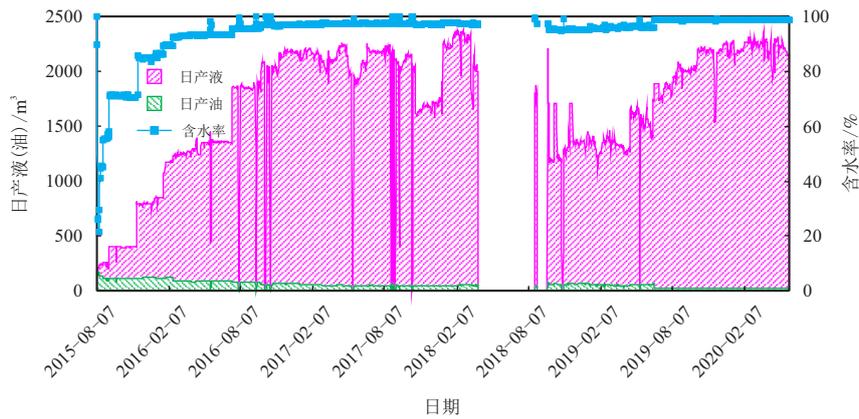


图 9 L 油藏 C 井生产曲线

Fig. 9 Production curve of Well C in L Reservoir

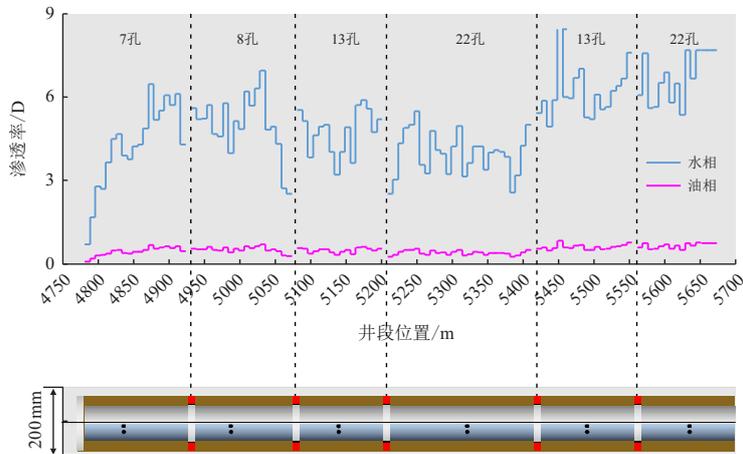


图 10 L 油藏 C 井沿井筒 AICD 布置示意图

Fig. 10 AICD arrangement diagram along with the wellbore of Well C in L Reservoir

如图 10 所示,根据 C 水平井沿井筒孔隙度、渗透率及含油饱和度的测井解释结果,将产层分为 6 段,借鉴 L 油藏早期开发井打孔管完井及其他油田的矿场经验^[24-25],在基管上均匀安装限流阀。根据限流阀的过流量实验,确定孔径 8 mm 限流阀在 6 MPa 压差下最大过流量为 28 m³/d。目前 C 井水平段有效长度 820 m,设计日产液量为 2 385 m³,安装 82 个限液阀,每 10 m 安装一个限液阀。

C 井应用 AICD 控水技术后日产液量为 1 610.1 m³,日产油为 132.9 m³,含水下降为 89.7%,下降了 6 个百分点,生产压差为 3.2 MPa。预计累计增油量增加 5.2×10⁴ m³。综合历史 L 油藏近 10 年来调整井的历史增产措施情况,通过对比分析控水增油效果,研究认为 AICD 控水技术效果较为明显,针对裂缝性底水稠油油藏具有一定适用性。

AICD 控水技术在实际矿场应用中,如果选择已生产井,结合生产动态优选含水突进油井,并结合单井水平段渗透率分布、轨迹距油水界面等地质条件分布下入 AICD 控水限液阀。在新钻调整井等应用中,应该结合水平段地质导向随钻测井解释成果,针对渗透率差异、饱和度差异、轨迹下降等不同情况优化 AICD 分布,从而达到均衡流场控水目的。

4 结 论

1) 研究了 AICD 技术在裂缝性底水稠油油藏水平井开发中的控水机理。分析了 AICD 是通过自主抑制微裂缝高渗带流量,均衡水平井供液剖面,提高水平井波及系数,增加有效井控储量的控水增油机理。

2) 物理模拟实验表明, AICD 控水装置对纯水有很强的阻流作用,纯油状态下流量与压差呈线性关系:黏度越大,通过 AICD 装置的流量越大;含水率越高,不同附加压降下,随着 AICD 附加压降增加,流量下降更加明显; AICD 对裂缝性底水稠油油藏水平井开发具有一定的适用性。该类油藏典型水平井数值模拟研究表明, AICD 技术控水效果明显,能显著增油。

3) 矿场实际运用 AICD 控水技术表明,该技术能抑制优势渗流通道水窜,针对裂缝性底水稠油油藏具有一定适用性,说明该技术对此类油藏水平井的控水增油具有推广运用前景。

符号说明

- p_{fracture} —裂缝地层压力, MPa;
 ρ —通过 AICD 的流体密度, kg/m³;
 v_{fracture} —流体在裂缝中的流速, m/s;
 $\Delta p_{\text{AICDfracfriction}}$ —AICD 对裂缝的附加压降, MPa;
 p_{matrix} —基质地层压力, MPa;
 v_{matrix} —流体在基质中的流速, m/s;
 $\Delta p_{\text{AICDmatfriction}}$ —AICD 对基质的附加压降, MPa;
 f —和密度有关的系数, 无因次;
 α_{AICD} —AICD 摩擦阻力系数, 无因次;
 q —AICD 混相体积流速, m³/s;
 b —计算压降与流量相关的系数, 无因次;
 ρ_{mix} —混相流体密度, kg/m³;
 ρ_i —校正密度, kg/m³;
 μ_{mix} —混相流体黏度, mPa·s;
 μ_i —校正黏度, mPa·s;
 y —系数, 无因次;
 σ_o —油相体积分数;
 ρ_o —油相密度, kg/m³;
 σ_w —水相体积分数;
 ρ_w —水相密度, kg/m³;
 w_o —油相比例;
 μ_o —油相黏度, mPa·s;
 w_w —水相比例;
 μ_w —水相黏度, mPa·s;
 Q —AICD 过流量, m³/s;
 K —渗透率, D;
 A —底水水锥前缘的截面积, m²;
 Δp —压差, MPa;
 K_{ro} —油相相对渗透率;
 μ_o —油相黏度, mPa·s;
 K_{rw} —水相相对渗透率;
 μ_w —水相黏度, mPa·s;
 x_t —底水水锥前缘位置, m;
 L —避水高度, m;
 p_e —地层静压, MPa;
 p_w —井底流压, MPa;
 R —综合渗流阻力, m³/MPa;
 R_{fracture} —裂缝渗流阻力, m³/(s·MPa);
 K_{fracture} —裂缝渗透率, mD;
 R_{matrix} —基质渗流阻力, m³/(s·MPa);
 K_{matrix} —基质渗透率, mD。

参考文献

- [1] 刘伟新, 宁玉萍, 王华, 等. 双重介质定量描述技术在复杂礁灰岩油田开发中的应用——以珠江口盆地流花 4-1 油田为例[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 65-71.

- LIU Weixin, NING Yuping, WANG Hua, et al. The application of the technique of quantitatively characterizing double-porosity medium in the development of complex reef-limestone oilfields: A case of LH4-1 Oilfield, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(3): 65-71.
- [2] 李楚吟, 吴意明, 张永江, 等. 南海礁灰岩油藏裂缝电阻率成像特征分析及评价[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(10): 72-76, 169. doi: 10.3969/j.issn.1000-9752.2012.10.017
- LI Chuyin, WU Yiming, ZHANG Yongjiang, et al. Characters of resistivity image in reef limestone reservoir fracture evaluation in the South China Sea[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(10): 72-76, 169. doi: 10.3969/j.issn.1000-9752.2012.10.017
- [3] 张杰, 康志江, 张允, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏油井出水特征及影响因素分析[J]. *中国石油大学胜利学院学报*, 2011, 25(3): 10-12. doi: 10.3969/j.issn.1673-5935.2011.03.005
- ZHANG Jie, KANG Zhijiang, ZHANG Yun, et al. Analysis on the characteristics and influencing factors of oil well water producing in fractured-vuggy carbonate reservoir[J]. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 2011, 25(3): 10-12. doi: 10.3969/j.issn.1673-5935.2011.03.005
- [4] 谢日彬, 李海涛, 杨勇, 等. 礁灰岩油田水平井微粒充填 ICD 均衡控水技术[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(2): 160-164. doi: 10.13639/j.odpt.2019.02.007
- XIE Ribin, LI Haitao, YANG Yong, et al. Particle filling based ICD isostatic water control technology used for horizontal wells in limestone reef oilfields[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(2): 160-164. doi: 10.13639/j.odpt.2019.02.007
- [5] 徐国民, 党庆功, 王倩, 等. 裂缝性储层化学堵水技术[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(30): 7513-7515. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2010.30.031
- XU Guomin, DANG Qinggong, WANG Qian, et al. Chemical water plugging technology for fractured reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(30): 7513-7515. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2010.30.031
- [6] 龙秋莲, 陈秋芬, 蒋海军, 等. 裂缝型稠油油藏选择性堵水工艺研究[J]. *钻采工艺*, 2008, 31(3): 43-46, 152. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2008.03.013
- LONG Qiulian, CHEN Qiufen, JIANG Haijun, et al. Technical study on selective water plugging for fractured heavy oil reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(3): 43-46, 152. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2008.03.013
- [7] 陶红胜, 申峰, 张军涛. 一种新型化学选择性堵水技术在裂缝性油藏的应用[C]. 北京: 第四届全国油气田开发技术大会论文集, 2011.
- TAO Hongsheng, SHEN Feng, ZHANG Juntao. Application of a new chemical selective water plugging technology in fractured reservoir[C]. Beijing: The 4th National Oil and Gas Field Development Technology Conference, 2011.
- [8] 罗启源, 代玲, 陈维华, 等. ICD 控水工艺技术在南海礁灰岩油田的应用与思考[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2016, 13(32): 68-73, 6. doi: 10.3969/j.issn.1673-1409(s).2016.32.014
- LUO Qiyuan, DAI Ling, CHEN Weihua, et al. Application study of ICD water control technology in reef limestone reservoir of South China Sea[J]. *Journal of Yangtze University (Nature Science Edition)*, 2016, 13(32): 68-73, 6. doi: 10.3969/j.issn.1673-1409(s).2016.32.014
- [9] 朱迎辉, 陈维华, 代玲, 等. 南海东部油田强底水油藏水平井开采特征及开采对策研究[J]. *石油地质与工程*, 2016, 30(5): 75-77, 141. doi: 10.3969/j.issn.1673-8217.2016.05.018
- ZHU Yinghui, CHEN Weihua, DAI Ling, et al. Producing characteristics and producing strategy of horizontal wells in strong bottom water reservoir[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2016, 30(5): 75-77, 141. doi: 10.3969/j.issn.1673-8217.2016.05.018
- [10] 阳明君. 水平井自动相选择控制阀控水完井技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- YANG Mingjun. Research on the theory and related tool for water control completion of horizontal well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [11] 阳明君, 李海涛, 蒋睿, 等. 一种新型底水油藏 AICD 控水原理与性能分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2016, 6(4): 64-68, 73. doi: 10.3969/j.issn.2095-1426.2016.04.012
- YANG Mingjun, LI Haitao, JIANG Rui, et al. Water control principle and performance analysis of a new AICD in bottom water reservoir[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2016, 6(4): 64-68, 73. doi: 10.3969/j.issn.2095-1426.2016.04.012
- [12] 陈献铭. 水平井 ICD 完井控水增油效果数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- CHEN Xianming. Numerical simulation study on water control and oil enhancement effort of horizontal well ICD completion[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [13] 曾泉树, 汪志明, 王小秋, 等. 一种新型 AICD 的设计及其数值模拟[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(2): 101-106. doi: 10.13639/j.odpt.2015.02.027
- ZENG Quanshu, WANG Zhiming, WANG Xiaoqiu, et al. A new type design of AICD and its numerical simulation[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(2): 101-106. doi: 10.13639/j.odpt.2015.02.027
- [14] 曾泉树, 汪志明, 王小秋, 等. 混合型流入控制装置改进及性能分析[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(1): 106-111. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2015.01.014
- ZENG Quanshu, WANG Zhiming, WANG Xiaoqiu, et al. Improvement and performance analysis of hybrid inflow control device[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(1): 106-111. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2015.01.014
- [15] 郭松毅, 汪志明, 曾泉树. 基于有序聚类的水平井 AICD 控水完井分段方法[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 70-75. doi: 10.11911/syztjs.2020013
- GUO Songyi, WANG Zhiming, ZENG Quanshu. An ordered clustering based segmentation method for water control completion with AICD in horizontal wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 70-75. doi: 10.11911/syztjs.2020013
- [16] 王丙刚, 邢洪宪, 唐咸弟, 等. 南海礁灰岩油藏自适应控水技术实验与分析[J]. *西部探矿工程*, 2018, 30(12):

- 49–52. doi: 10.3969/j.issn.1004-5716.2018.12.016
- WANG Binggang, XING Hongxian, TANG Xiandi, et al. Experiment and Analysis of adaptive water control technology for reef limestone reservoir in South China Sea[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(12): 49–52. doi: 10.3969/j.issn.1004-5716.2018.12.-016
- [17] 邹伟林. 水平井 AICD 完井技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
ZHOU Weilin. A research on horizontal well completion technology with AICD[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [18] 朱橙, 刘华伟, 李登, 等. AICD 管柱工艺在海上油田水平井中的控水效果分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(8): 125–128. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2016.08.068
ZHU Cheng, LIU Huawei, LI Deng, et al. Analysis of water control effect of AICD string technology applied to horizontal wells in offshore oilfields[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016, 36(8): 125–128. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2016.08.068
- [19] 刘明全, 冯全雄, 肖为, 等. 流花 11-1 生物礁油田底水快速锥进研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 49–56. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2012.12.24.01
LIU Mingquan, FENG Quanxiong, XIAO Wei, et al. Fast coning of bottom water in bioherm oilfield of LH11-1[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(2): 49–56. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2012.12.24.01
- [20] MATHIESEN V, AAKRE H, WERSWICK B, et al. The autonomous RCP valve – New technology for inflow control in horizontal wells[C]. SPE 145737-MS, 2011. doi: 10.2118/145737-MS
- [21] 宁玉萍, 王峻峰, 罗东红, 等. 流花油田礁灰岩储层微观性质及驱替特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 34–44. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2017.09.04.02
NING Yuping, WANG Junfeng, LUO Donghong, et al. Study on the displacement characteristics and microscopic properties of the reef limestone reservoir in Liuhua Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(6): 34–44. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2017.09.04.02
- [22] 王志强. LH11-1 油田礁灰岩油藏水驱及提高采收率渗流机理实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
WANG Zhiqiang. Experimental study on water flooding and enhanced oil recovery mechanism of reef limestone reservoir in LH11-1 Oilfield[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [23] HALVORSEN M, ELSETH G, NÆVDAL O M. Increased oil production at troll by autonomous inflow control with RCP valves[C]. SPE 159634-MS, 2012. doi: 10.2118/159634-MS
- [24] 张建丰. 水平井新型控水装置的设计与研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.

ZHANG Jianfeng. Design and research of new type water control device for horizontal wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

- [25] 陈飞飞. ICD 在水平井中控水调剖参数优选研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
CHEN Feifei. Research on parameter optimization for water control and profile control with ICD in horizontal wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

作者简介



杨勇, 1983 年生, 男, 汉族, 湖北襄阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气田开发等方面的研究工作。
E-mail: yangyong7@cnooc.com.cn



孙常伟, 1991 年生, 男, 汉族, 安徽六安人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田开发动态分析方面的研究工作。E-mail: sunchw4@cnooc.com.cn



江任开, 1983 年生, 男, 汉族, 福建龙岩人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田开发方面的动态分析研究工作。E-mail: jiangrk@cnooc.com.cn



李小东, 1986 年生, 男, 汉族, 河北张家口人, 工程师, 硕士, 主要从事油藏数值模拟等方面的研究等工作。E-mail: lixd5@cnooc.com.cn



刘远志, 1987 年生, 男, 汉族, 山东临沂人, 工程师, 主要从事油气田开发动态分析方面的研究工作。
E-mail: liuyzh4@cnooc.com.cn

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpxb.com>