

胜利油田智能完井技术研究新进展

余金陵^{1,2} 魏新芳²

(1. 西南石油大学 机电工程学院,四川 成都 610500;2. 中国石化胜利石油管理局 钻井工艺研究院,山东 东营 257017)

摘 要:智能完井技术综合运用传感技术、信息技术和控制技术来提高油井产能、降低作业风险和费用,实现资源利用和油田开发效益的最大化,是现代完井技术的发展方向。简单介绍了国内外智能完井技术的研究现状,重点介绍了胜利油田智能完井技术的研究进展情况:目前已研制出整体性能与国外同类产品接近的高强管外封隔器,能达到现场要求的遇油遇水自膨胀管外封隔器;形成了均衡供液筛管分段完井技术和数据采集技术;建立了处理井下产液和压力数据的数学模型,根据处理结果可以判断出水层位。通过筛管分段完井数据采集模拟试验,对采用数学模型处理井下产液和压力数据判断出水层位的方法进行了验证,结果表明,该方法可行,可为现场采用筛管分段完井及判断控制井下水层位提供理论依据。

关键词:智能完井;套管外封隔器;筛管;数据采集;数学模型;数据处理
中图分类号:TE257 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)02-0068-05

New Development of Intelligent Well Completion Technology in Shengli Oilfield

Yu Jinling^{1,2} Wei Xinfang²

(1. College of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Sinopec, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: Intelligent well completion technology integrates sensing, information and control technology to increase well productivity, to lower operation risk and cost, to achieve effective use of resources, and to maximize oil field development. It is the development trend of modern well completion technology. This paper presents the state-of-art of intelligent well completion technology abroad and highlights the progress in Shengli Oilfield. Two kinds of external casing packers are developed. The overall performance of high-strength packer is close to the similar product abroad. The other is oil/water swell packer which satisfy the field requirements. Equi-flow screen segregated completion and data acquisition are developed. The mathematical model to analyze the downhole production and pressure was developed, which can be used to determine the water zone. This model is tested by segregated screen completion data acquisition experiment. The results indicate that it's reliable and can provide theoretical reference for segregated screen completion, and identification and controlling of water production.

Key words: intelligent well completion; external casing packer; screen liner; data acquisition; mathematical model; data processing

智能完井是一种能够采集、传输和分析井下生产和油藏状态参数,且能依据分析结果对井下产层供液进行调控的完井系统^[1-5],其主要作用有:1)根据各个层段生产指数的变化,判断和确定节流生产段,关闭或抑制产水层段;2)实时监测油井井筒内的诸多参数,更科学、更简化地管理非均质油藏;3)减少作业次数,直接降低操作费用和风险,提高安

收稿日期:2010-09-17;改回日期:2011-01-18
基金项目:国家科技重大专项项目“低渗油气田完井关键技术研究”(编号:2008ZX05022-006)部分研究成果
作者简介:余金陵(1970—),男,安徽安庆人,1994年毕业于西南石油学院矿机专业,2002年获上海交通大学机械专业工程硕士学位,在读博士研究生,高级工程师,主要从事完井工具及完井工艺方面的研究。
联系方式:(0546)8550952, yujinling1994@163.com

全性。

智能完井技术综合运用传感技术、信息技术和控制技术来提高油井产能、降低作业风险和费用,实现资源利用和油田开发效益的最大化,用可以实现的技术手段达到完井工程技术的终极目标,因而成为石油完井技术领域的焦点,也代表了完井技术的发展方向。为此,胜利油田在智能完井技术研究和应用方面做了大量的工作,并取得了一些进展。

1 国内外智能完井技术现状

1.1 国外研究现状

鉴于智能完井技术的重要性,国外公司竞相投入人力物力对其进行了攻关:

1) 贝克休斯公司研制出了石油行业第一套高级智能完井系统——InCharge 智能完井系统,该系统实现了完全电气化,可以远程实时遥控生产作业和注入管理。InCharge 系统使用可变阻流器和高精度温度压力传感器,对油管 and 环空中井底油层的实时压力、温度和流量及油井的生产和注入情况进行监测,对各个油层的流量进行连续监测和控制。该系统还可以通过个人计算机选择打开或者关闭某一产层。

2) 斯伦贝谢油田服务公司已在 14 口井上安装了可回收式流量控制器,其中 8 套在 Troll 油田、3 套在 Oseberg 油田、3 套在 Wytch Farm 油田。第一套全电控智能完井系统于 2000 年 8 月在 Wytch Farm 油田应用,当油井老井眼出水时,从老井眼中钻两个分支井眼,并对每个分支井眼进行井下流量控制,从而有效恢复了油田产能。

3) WellDynamics 动态公司推出的智能井系统包括地面控制系统、控制系统和井下设备三大部分。截至目前,该公司在 200 多口井上安装了智能井系统。

目前智能完井尚需借助人工界面发布指令实现对生产井的控制,虽然各种类型的电子、电动-液压与光学-液压完井系统已经获得成功应用,但是目前液压动力智能完井系统仍占主导地位。

1.2 国内研究现状

近几年国内对智能完井技术关注较多,在完井工具方面有一定进展,但还没有形成核心技术。胜利油田经过多年的科研攻关,在智能完井方面取得了一些阶段性成果:研制的高强压缩式管外封隔器

整体性能接近国外同类产品的水平,遇油遇水自膨胀管外封隔器已经能够满足现场应用的要求;形成的均衡供液筛管分段完井技术和数据采集技术已应用 50 井次,控水效果明显;建立了处理井下产液和压力数据的数学模型,该模型可以根据处理结果判断出水层位;通过筛管分段完井数据采集模拟试验,对采用数学模型处理井下产液和压力判断出水层位的方法进行了验证。胜利油田的这些研究及成果,为我国形成完整的智能完井技术提供了理论和硬件基础。

2 胜利油田智能完井技术研究

完整的智能完井技术由 4 大技术组成:分段完井技术、采集传输技术、解释处理技术和井下工具控制技术。胜利油田在前 3 大技术领域都进行了探索研究,并都取得了一定的成果。

2.1 分段完井技术

分段完井技术就是将产层用管外封隔器封隔成段的完井技术,其核心是管外封隔器及配套施工工艺。

2.1.1 管外封隔器的研制

要保证筛管分段长期有效,首先是要研制封隔压力高、寿命长的管外封隔器。

高强压缩式管外封隔器 在国外,通常采用压缩式封隔器进行管外封隔,如裸眼分段压裂。但在国内,现有的压缩式封隔器存在膨胀率小、胶筒强度不高等问题,所以封隔效果不理想,特别是在井径不规则的情况下。因此,在常规压缩式封隔器基础上开发出了一种高强压缩式管外封隔器,并对胶筒结构进行了改进。该封隔器的整体性能接近国外同类封隔器的水平(见表 1)。

表 1 $\phi 139.7\text{ mm}$ 高强压缩式管外封隔器试验结果
Table 1 Test results of $\phi 139.7\text{ mm}$ compressive external casing packer

封隔器类型	最大膨胀 外径/mm	有效膨胀 外径/mm	最大封隔 压力/MPa
国外完井分段用压缩式封隔器	350	275	55
高强压缩式管外封隔器	360	275	48
国内常规压缩式封隔器	290	230	30

遇油遇水自膨胀管外封隔器 拉伸测试表明,遇油遇水膨胀橡胶拉伸强度中值 7.6 MPa,扯断伸

长率中值 488%，邵氏硬度 45~55，耐温 100℃，部分指标达到了现场应用要求^[6]。

试制了遇油遇水膨胀橡胶封隔器，进行了地面

承压试验：将外径为 110.0 mm(中心管尺寸为 88.9 mm)的遇油遇水封隔器置于 $\phi 139.7$ mm 套管内膨胀后试压，测其试封隔能力，结果见表 2。

表 2 遇油遇水自膨胀封隔器封隔能力试验
Table 2 Isolation test of water and oil swellable packer

编号	封隔器中心管尺寸/mm	封隔器胶筒外径/mm	套管尺寸/mm	套管内径/mm	封隔器胶筒长度/m	承受最大压力/MPa
1#	88.9	110.00	139.7	124.3	2	18.5
2#						21.0

2.1.2 均衡供液筛管分段完井技术

均衡供液筛管分段完井技术是从地质、钻井、生产全方位分析筛管完井的产液情况，判断水进过程，在系统理论上将产层封隔成段，再通过控流筛管、盲管比例来调节产层供液，使水平井底水液面均匀推进，从而延缓和控制底水锥进，延长油井寿命。

针对 Y12-P21 井和 X68-P4 井存在底水且周边区域井存在含水率高、单井产油量低的问题，在数值模拟和试验的基础上，在这两口井的油层段下入了 $\phi 139.7$ mm 变密度精密滤砂管进行均衡供液筛管分段完井。目前，这两口井的产油量均达到 20 t/d，是同区块邻井产油量的 3 倍，而含水率是邻井的 1/3，达到了控水增产的目的。

2.2 数据采集技术

数据采集传输就是利用传感器采集产液参数并通过有线或无线方式传输到井口。

2.2.1 筛管分段完井井下数据采集仪器安装方法

技术方案如图 1 所示：外管柱是筛管、管外封隔器的组合，管外封隔器对水平产层进行有效封隔；内管柱是工作管柱，内管柱上串接机械式内管封隔器，

内管封隔器的位置与管外封隔器位置对应，每段内管打孔、安置数据采集仪器。这样井眼各段的产液经筛管对应流入内管段，数据传感器就会采集到产液数据。

2.2.2 数据传感器

选择数据传感器的原则有 2 个：一是要了解被测量的特点，如被测量的状态、性质，测量的范围、幅值和频带，测量的速度、时间、精度要求，过载幅度和频度等；二是要了解使用条件，主要包括环境条件和基础条件两部分。胜利油田考虑到应用环境及经济因素，鉴于电子传感器具有精度高、尺寸小、耐高温耐压能力强、施工作业相对简单、成本低等优点，选择电子传感器作为数据传感器。

2.3 数据处理技术

数据处理就是根据传输上来的数据，分析出各段点的产液状况。

2.3.1 数据处理模型

在水平井筒中，首先利用连续性方程和动量守恒方程，基于油藏渗流和井筒流动的耦合，建立水平井筒油水两相变质量分层流动的基本模型和压降计算模型，再结合生产井的具体生产数据，分析水平井分段完井后不同井段的井下压力分布特征。

微元段的质量守恒方程为：

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho_o A_o u_o) = \rho_o q_o \\ \frac{d}{dx}(\rho_w A_w u_w) = \rho_w q_w \end{cases} \tag{1}$$

微元段的动量方程为：

$$\begin{cases} -A_o \frac{dp}{dx} = \tau_{wo} s_o \pm \tau_i s_i + \frac{d}{dx}(\rho_o A_o u_o^2) \\ -A_w \frac{dp}{dx} = \tau_{ww} s_w \pm \tau_i s_i + \frac{d}{dx}(\rho_w A_w u_w^2) \end{cases} \tag{2}$$

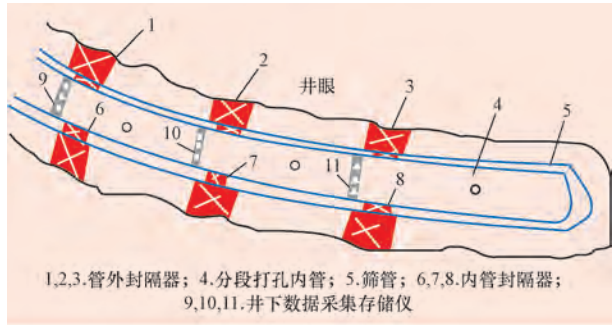


图1 能实现井下数据采集存储的筛管分段完井技术
Fig.1 Segregated completion which can realize data acquisition and storage

式中: ρ_o 、 ρ_w 分别为油相、水相的密度, kg/m^3 ; A_o 、 A_w 分别为水平井筒横截面上油相、水相的截面积 ($A_o + A_w = A$, A 是水平井筒的横截面积), m^2 ; u_o 、 u_w 分别为水平井筒横截面上油相、水相的流速, m/s ; q_o 、 q_w 分别为单位水平井筒长度壁面流入的油、水体积流量, m^3/s ; p 为水平井筒内压力, Pa ; s_o 、 s_w 分别为过流断面上油相、水相边界的长度, m ; s_i 为油水两相在横截面上分界线的长度, m ; τ_{wo} 为油相与管壁的剪切应力, Pa ; τ_{ww} 为水相与管壁的剪切应力, Pa ; τ_i 为油水两相分界面的剪切应力, Pa ; 在水相速度大于油相时式(2)中的两式均取正号, 否则式(2)中的两式均取负号。

$$\text{由于 } \frac{d}{dx}(\rho_o A_o u_o)^2 = u_o \frac{d}{dx}(\rho_o A_o u_o) + \rho_o A_o u_o \frac{du_o}{dx},$$

$$\frac{d}{dx}(\rho_w A_w u_w)^2 = u_w \frac{d}{dx}(\rho_w A_w u_w) + \rho_w A_w u_w \frac{du_w}{dx}, \text{ 可知:}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho_o A_o u_o)^2 = \rho_o u_o q_o + \rho_o A_o u_o \frac{du_o}{dx} \\ \frac{d}{dx}(\rho_w A_w u_w)^2 = \rho_w u_w q_w + \rho_w A_w u_w \frac{du_w}{dx} \end{cases} \quad (3)$$

压降计算模型为:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{1}{A_o + A_w} \left(\tau_{wo} s_o + \tau_{ww} s_w + \rho_o u_o q_o + \rho_w u_w q_w + \rho_o A_o u_o \frac{du_o}{dx} + \rho_w A_w u_w \frac{du_w}{dx} \right) \quad (4)$$

由于油水界面间的摩擦相互抵消, 且 $A_o + A_w = A$, A 为水平井筒的横截面积, 即 $A = \frac{\pi d^2}{4}$, 则有:

$$\Delta p = -\frac{4}{\pi d^2} (\tau_{wo} s_o \Delta x + \tau_{ww} s_w \Delta x) - \frac{4}{\pi d^2} (\rho_o u_o q_o \Delta x + \rho_w u_w q_w \Delta x) - \frac{4}{\pi d^2} (\rho_o A_o u_o \Delta u_o + \rho_w A_w u_w \Delta u_w) \quad (5)$$

从式(5)可看出, 水平圆管油水两相变质量压降由 3 部分组成 ($\Delta p = \Delta p_{\text{wall}} + \Delta p_{\text{mir}} + \Delta p_{\text{acc}}$), 分别是摩擦损失压降 Δp_{wall} 、壁面入流的动量损失压降 Δp_{mir} 和由于流速增加引起的加速度压降 Δp_{acc} 。

2.3.2 数据处理

预设进行筛管分段的完井方法如图 2 所示。

由于油藏的特征不同, 水平井可能先从 A 段出水, 水平井段的出水层位也可能是随机的。日产液量、日产油量和含水率这三个关键参数是 A 段、C 段、E 段产出流体的综合反应, 在井口无法分辨出出水层位。在图 2 中的 1、2、4 位置预先下入 3 个压力传感器, 测得 3 个位置的壓力数据, 再通过数据处理

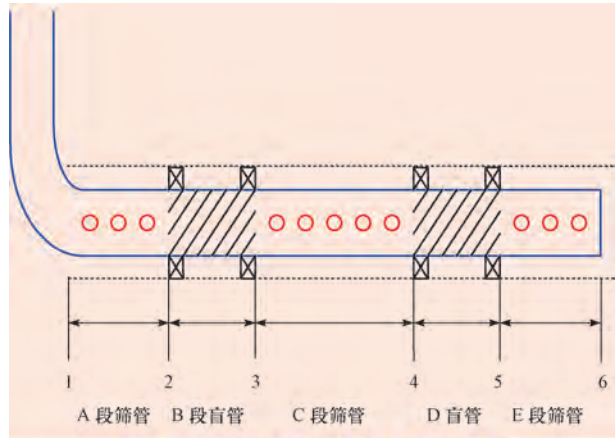


图2 带ECP的筛管堵水完井管柱示意
Fig.2 Water shutoff completion string with ECP and screen

就能判断出水段。

理论计算表明, 压力测试点 p_4 在含水小于 40% 时, 不同段出水压力异常的差异不明显, 但是仍然可以分辨。含水大于 40% 时, 差异极为明显, 容易判断出水层位, 这正是高含水期急需判断出水层位的时机。不论是 A 段、C 段还是 E 段出水, 压力测试点 p_4 压力异常在含水大于 50% 以后都很明显。

根据计算结果, 当 A 段产水时, 含水在 20% 的时候, 压力点 p_1 的异常值约为 0.23 MPa, 而压力传感器的测量精度为 0.01 MPa。随着含水的上升, 压力异常值不断增大, 即使井下压力传感器发生部分漂移, 含水大于 20% 时, 也完全可以判断压力异常, 从而准确判断出水层段。

2.4 筛管分段完井数据采集模拟试验

设计开发了地面筛管分段完井数据采集模拟试验装置: 以 $\phi 244.5 \text{ mm}$ 套管模拟水平井眼 ($\phi 244.5 \text{ mm}$ 套管每段外连泵以泵入油或水), $\phi 139.7 \text{ mm}$ 套管串接管外封隔器将 $\phi 244.5 \text{ mm}$ 模拟井眼分段 ($\phi 139.7 \text{ mm}$ 套管每段打适量孔), $\phi 88.9 \text{ mm}$ 内置工作管柱封隔段与 $\phi 139.7 \text{ mm}$ 封隔段对应 ($\phi 88.9 \text{ mm}$ 内置工作管每段打适量孔), 通过 $\phi 88.9 \text{ mm}$ 内置工作管柱上串接的压力传感器采集不同模拟井段的压力数据, 压力传感器的安放位置为图 2 中的 1、2、3、4、5、6。

将采集到的产液量、产油量和各点压力数据处理得出各段出水时井底流压沿井筒的分布曲线, 见图 3~5。将图 3~5 与实际进水量 (由泵压和流量控制) 对比发现基本吻合, 验证了分段完井方式下, 通过采集产液参数和井底流压再进行处理分析判断

出水情况方案的可行性。

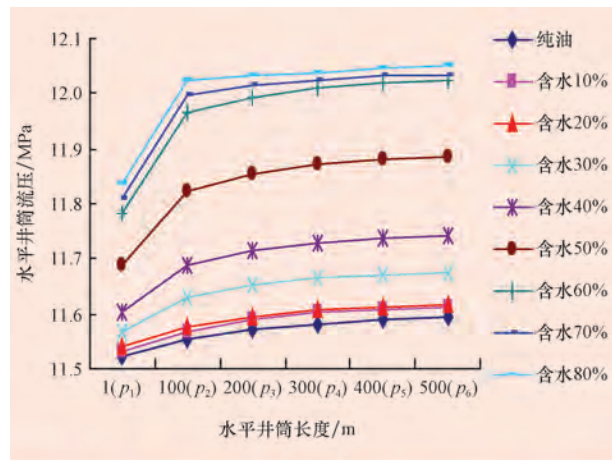


图3 A段出水时井底流压沿井筒的分布曲线

Fig.3 Flowing pressure vs. horizontal lateral length with water production in section A

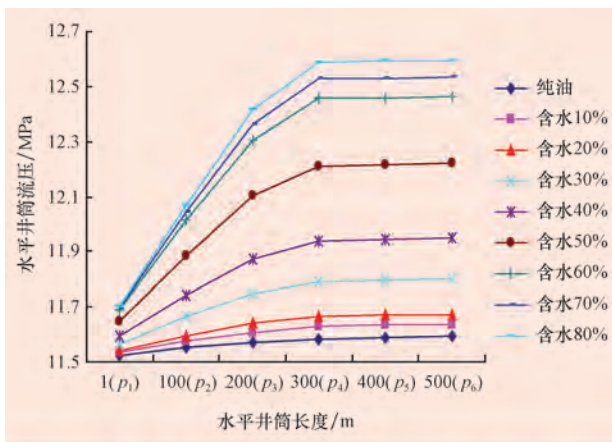


图4 C段出水时井底流压沿井筒的分布曲线

Fig.4 Flowing pressure vs. horizontal lateral length with water production in section C

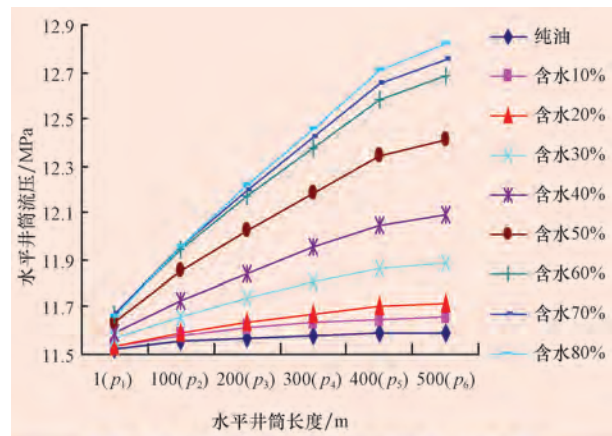


图5 E段出水时井底流压沿井筒的分布曲线

Fig.5 Flowing pressure vs. horizontal lateral length with water production in section E

3 结 论

1) 智能完井是完井技术的发展方向,把智能完井技术的部分技术或方法应用于常规完井设计将形成诸多实用的完井新技术。

2) 胜利油田所研制的高强压缩式封隔器整体性能接近国外同类产品的水平,遇油遇水自膨胀管外封隔器能简化分段完井施工程序,满足现场要求。

3) 均衡供液筛管分段完井技术的控水效果明显。

4) 根据井下产液和压力数据判断出水层位的方案得到了室内试验验证,具有可行性,可为智能完井提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 侯培培,段永刚,严小勇,等.智能完井技术[J].天然气勘探与开发,2008,31(1):40-43.
Hou Peipei, Duan Yonggang, Yan Xiaoyong et al. Intelligent well completion [J]. National Gas Exploration and Development, 2008, 31(1): 40-43.
- [2] 肖述琴,陈军斌,屈展.智能完井综合系统[J].西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(2):37-40,44.
Xiao Shuqin, Chen Junbin, Qu Zhan. Intelligent well completion system [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(2): 37-40, 44.
- [3] 安永生,吴晓东,韩国庆.智能井技术在五点法井网中的应用[J].石油钻探技术,2008,36(2):64-66.
An Yongsheng, Wu Xiaodong, Han Guoqing. Application of smart well technology in five-spot well pattern [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(2): 64-66.
- [4] 张绍槐.智能油井管在石油勘探开发中的应用与发展前景[J].石油钻探技术,2004,32(4):1-4.
Zhang Shaohuai. The application and developing trend of the intellipipe used in petroleum exploration and production [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(4): 1-4.
- [5] 安永生,吴晓东,孔鹏,等.智能井优化控制模型在油田开发生产中的应用[J].石油钻探技术,2007,35(6):96-98.
An Yongsheng, Wu Xiaodong, Kong Peng, et al. Smart well control in oilfield development [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 96-98.
- [6] 徐鑫,魏新芳,余金陵.遇油遇水自膨胀封隔器的研究与应用[J].石油钻探技术,2009,37(6):67-69.
Xu Xin, Wei Xinfang, Yu Jingling. Researches and applications of oil/water expandable packers [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 67-69.