

水平井产出剖面监测新方法

闫正和

中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518000

通讯作者: yanzhh@cnooc.com.cn

项目支持: 中国海油石油总公司“十二五”重大科技项目“海相砂岩特高含水期挖潜技术”(CNOOC-KJ125ZDXM06LTD 01 SZ 2011)、中国海油有限公司“十三五”综合科研项目“南海东部生物礁灰岩油田提高采收率研究”(YXKY-2015-SZ-01)

引用: 闫正和. 水平井产出剖面监测新方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(2): 49-56.

Cite: YAN Zhenghe. New methods for monitoring the production profile of horizontal wells[J]. Well Testing, 2022, 31(2): 49-56.

摘要 为实现水平井段沿程产出剖面及油水两相持率的连续监测,从电学、声学、光学等角度开展研究,形成了水平井产出剖面光纤监测方法和示踪剂监测方法。这两种方法均将传感器或示踪剂预置在完井管柱上,可实现水平井产出的连续监测。光纤监测方法在 X23-A20H1 井首次实现了每米水平井段油水产出剖面高精度的实时和全油井生命周期的连续监测;示踪剂监测方法首次在 L11-C7H3 井的 5 个封隔水平段油水产出剖面进行了 2~3 年的连续监测,效果良好。该方法为水平井段水淹分析、剩余油分布研究和水平井出水治理措施的制定提供了直接而又丰富的资料,同时也为不具备传统送入式测试法作业条件的水平井各相产出剖面监测成为可能。

关键词 水平井;完井管柱;产出剖面;动态监测;光纤监测;示踪剂监测;相持率;剩余油分布

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.02.009

New methods for monitoring the production profile of horizontal wells

YAN Zhenghe

Shenzhen Branch of CNOOC (China) Limited, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract: To realize the continuous monitoring of production profile and oil-water two-phase holdup along the horizontal well section, the optical fiber monitoring method and tracer monitoring method of production profile of horizontal wells were developed after researches from the electric, acoustic and optical perspectives. In both methods, sensors or tracers are preset on the completion string, which can realize the continuous monitoring of horizontal well production. The optical fiber monitoring method realized a high-precision, real-time and lifecycle continuous monitoring of oil/water production profile per meter of horizontal well section in Well X23-A20H1 for the first time. The tracer monitoring method was successfully used, for the first time, to continuously monitor the oil/water production profiles of five isolated horizontal sections of Well L11-C7H3 for 2-3 years. These methods provide direct and abundant data for the analysis of water flooding in horizontal well section, the study of remaining oil distribution and the solution to water production in horizontal wells, and also make it possible to monitor the production profile of each phase of horizontal well without the conditions for tests based on traditional conveying method.

Keywords: horizontal well; completion string; production profile; dynamic monitoring; optical fiber monitoring; tracer monitoring; holdup rate; remaining oil distribution

水平井因其产能高、泄油面积大等特点,在油气田尤其是海上油气田的开发中应用广泛,目前在南海东部海域 90% 以上的开发井为水平井。然而,由于沿水平井段的储层物性非均质的存在(甚至发育裂缝)、生产压差的不均衡、距离边底水远近的不同等原因,生产过程中水平井沿生产井段的见水先后、产水量大小及含水率高低均不同;水平段局部一旦见水突破其产能就开始递减,特别是在海上油

田高采油速度、高采油强度的经济性要求下,许多水平井含水上升速度过快,使水平井的开发效果及经济效益受到影响^[1-3],严重抑制了水平井优势的发挥,甚至成为了水平井的“硬伤”。为了治理该问题,出现了各类针对性的水平井控水、堵水措施,但其有效性很大程度上限制于对水平井段油水两相产出剖面的准确认识。

为精确指导油藏水平井完井设计、延缓生产时

的含水上升速度、提高控堵水措施的效果,油田开发对水平井的动态测试需求越来越迫切,特别是以水平井为主开发的油藏进入高含水的中、后开发期,迫切需要了解水平段的产液状况,寻找剩余油富集区。利用动态监测技术对油藏动用程度、出水规律进行监测,可以有效指导增产措施制定及科学调整作业方案,提高水平井开发效果。

1 水平井出水层位及剩余油分布

为了提高水平井的开发效果,减缓水平井含水上升速度,近年来南海东部油田多次采用了 ICD、化学堵水、AICD 等控水技术^[4],但是这些控水技术成功的关键是准确确定出水层位及水平段的剩余油富集区。目前研究和认识出水层位和剩余油形成与分布方法有很多,包括从地震、地质、开发、测井不同角度来进行研究,各种方法都具有其应用的优越性和局限性。众多研究者采用综合的方法从微观岩心到宏观储层、从静态资料到动态数据、从定性分析到定量研究以及从机理、成因到影响因素等对出水层位和剩余油分布做了大量的理论和实验研究,进行了测井解释、水淹层饱和度解释、产液剖面 and 同位素吸水剖面测试、地化录井、岩心水驱实验、室内平面及三维物理模型实验、密闭取心、分层找水等现场试验及油藏工程、油藏数值模拟等各种研究工作。实践证明产液剖面动态监测技术是最为准确和直观的确确定出水层位和剩余油富集区的方法。

2 水平井送入式产液剖面技术

产液剖面动态监测测井技术主要是送入式水平井产液剖面测井技术,该技术是利用爬行器或连续油管将产液剖面测井仪和持率计送入到水平井段,精确检测油气水在开井条件下的物理参数,通过各种解释方法精确确定水平井各段的产液剖面。南海东部多口井使用了该技术,但是存在测试费用高、工程作业风险大的风险,成功率不足 30%,且无法做到长期的连续监测^[5~8]。

2.1 基本原理

水平井送入式产液剖面测井技术主要是测量油、气、水的物性参数,通过测量表征油、气、水的物性参数可以得到各种介质的比例和流速。以地层

流体为例,表征地层流体的物性参数主要包括体积系数、密度、黏度、溶解气水(油)比、压缩系数、原油泡点压力等,各单相的物性参数可以通过实验室获得;测井仪器可以获得水平井段不同位置的温度、压力和混合流体的总密度、持率、流速等参数;地面计量可以获得总的含水率、气油比和流量信息。通过数理计算可以获得各单相流体在整个水平段的分布情况和各个位置的产出情况^[9]。

因油、气、水三相介质的重力及密度的差异,水平段内油气水是呈层状分离流动的,通过在测井仪器伸缩臂的不同位置安装流量计和持率计等,可以监测水平井垂流流动截面不同位置的流量、密度、持率等参数可以获得整个水平段流动截面的流动情况,提高测井仪器的精度。

2.2 应用案例分析

随着近年来南海东部油田步入高含水期,占油田 90% 以上的水平油井的控堵水需求越来越强烈,为了准确了解水平井的产出剖面,找准出水位置为后续控堵水设计、施工和评价提供准确参数,2012 年和 2018 年西江油田分别进行了 2 次水平井产出剖面测井。

2012 年在西江 A 油田 A3 井采用 Schlumberger 公司的 FSI+PSP 测井仪器与爬行器组合进行产出剖面测井,但是受井斜及仪器串长度影响,在通过 Y-TOOL 后出现无法顺利回收的问题,该井在井下对爬行器及测井仪器的各项参数监测显示,仪器工作正常,经过多次尝试,测井工具串回收至油管内,考虑后续作业风险,该井取消作业。

2018 年在西江 B 油田 B10 井采用 Sondex 公司的 MAPS+PLT 测井仪器与爬行器组合进行产出剖面测井,在实际测井过程中,发生 4 次遇卡,更换 3 次爬行器和 1 次工具串后测试取得成功。关井测量时,MAPS 仪器组合及常规 PLT 测井仪器响应良好且资料匹配性良好。阵列电容持水率计 CAT 和常规电容持水率计 CWH,能清晰指示出关井状态下井筒中的气、油、水界面。阵列电阻式水率计 RAT,清晰指示出井筒中烃和水的界面,与电容持水率计显示的油水界面一致。三上三下连续测量,各趟涡轮转速曲线平行,且基于零线对称,温度、压力、持率等曲线重复性良好,解释成果见图 1。

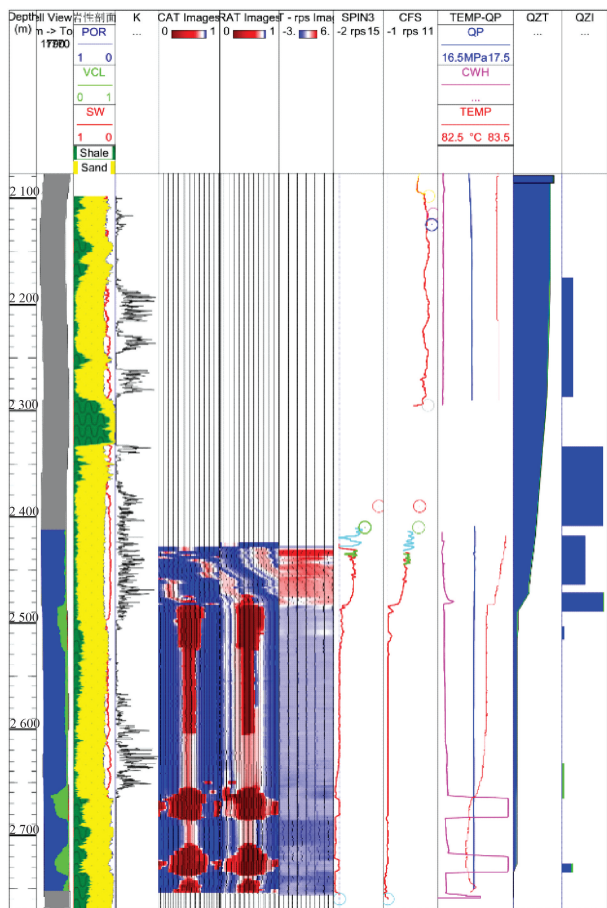


图1 B10井产出剖面测井解释成果图

Fig. 1 Production profile interpretation result in the horizontal well of B10

2.3 技术优点及存在的不足

(1)测井成果精度高,但存在仪器不稳定,易发生工具失灵现象。

送入式产液剖面测井技术仪器精度高、技术原理成熟,能够有效获得地层流体的物理参数,并得到最为准确的水平段产液剖面,对后续堵、控水具有决定性的指导意义。

(2)无需改变完井方式,完井成本低,但是存在单次作业成本高,无法连续监测的问题。

送入式产液剖面测井技术是通过将仪器送入到水平井段进行测量,测量完成后会将工具取出,无需改变目标井的完井方式,不会增加完井方面的成本。但水平井产液剖面测井仪因工具复杂且作业井次少等原因,作业成本高,难以形成连续的监测跟踪。

(3)井筒清洁程度要求高,易造成复杂情况。

水平井送入式产液剖面测井技术因需要利用爬行器或连续油管将测井仪器通过Y工具并送入到水平段,且测井仪器上有伸缩臂、集流罩等部件,

当井筒内有异物或出砂时可能造成伸缩臂或集流罩无法回收,导致遇卡现象,严重的可能造成仪器落井等工程事故。

3 水平井产液剖面光纤监测技术

为了解决该问题,从“十二五”到“十三五”期间,南海东部海域先后开展了光纤分布式声波传感和基于油溶性和水溶性缓释型示踪剂的两种永置式新型水平井产出剖面监测方法的研究,成功开发了新型蓝宝石光纤压力计及光纤多相流监测系统,引进了缓释型示踪剂监测方法并创新改进了完井设计和解释方法,并在矿场中进行了2口井的2~3年的实验性应用。实践证明,这两种新方法实现了水平井两相产出剖面的连续实时监测,并为不具备传统送入式测试法作业条件的水平井的监测实现了可能,特别是对复杂井况水平井和特殊开发模式下(如海上无人平台或水下井口开发模式)的开发井有较好应用前景;这两种水平井产出剖面监测方法的研究与应用在国内均属首次,其中光纤分布式声波传感水平井产出剖面技术中所采用的多项技术属国际首次或达国际领先。

3.1 基本原理

水平井产液剖面光纤监测技术是利用光学、声学原理及井内流体的光学、声学特性设计高精度且稳定的流量、温度、压力和密度传感器,这些传感器在完井阶段下入到水平段,连续监测水平井产液剖面变化的一种监测方法。该技术成功的关键是传感器的研究与制作。

3.1.1 压力和温度传感器

光纤永久式井下温度压力监测系统里的压力和温度传感器采用的是法布里—帕罗腔的技术原理(FP技术),假定FP测量仪的空腔长度为 L_2 ,由这台FP测量仪所反射的光在CCD组合器中具有 L_2 长度的空腔相联的像素上得到最大的传播,也就是说在空间分布的横向长度为 L_2 的FP空腔中得以最大传播。如图2所示,FP空腔长度的变化被转化成一系列具有最大传播的像素位移^[10-14]。

激光由光纤一端进入法帕腔时,部分光能量在该端的光纤端面形成反射,其余光能量继续前向传播,继而由第二个光纤端面进行反射,并且反向进入第一段光纤。两次反射的激光在探测器表面形成干涉,干涉光谱由法帕腔的腔长值唯一决定,在频率域为正弦波。通过测量正弦波的周期和相位,

则可以精确得知腔长。实验证明:外界压力 p 的大小和法布里——帕罗腔的空腔长度 L_2 之间是成反比的关系,通过对压力传感器的标定可以得出压力传感器的标定曲线,温度与腔长 L_1 具有相对应的关系,通过对温度传感器的标定可以得出温度传感器的标定曲线。

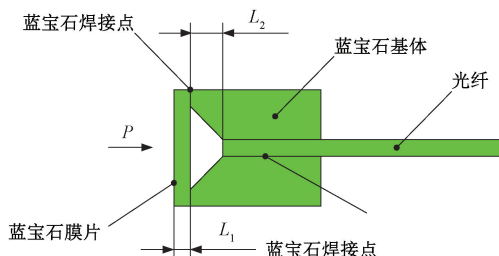


图2 蓝宝石压力计结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of sapphire manometer

永久式井下温度压力监测系统的工作原理是通过安装于解调器内的激光器发出一束激光,光信号通过光纤到达井下的温度和压力传感器,温度和压力传感器将对激光器发射出来的光谱信号进行反射,当环境温度和井下压力发生变化时,从传感器反射回来的光谱信号也将发生相应的改变,反射回来的光谱信号通过井下光缆反向传输到解调器内的探测器中,通过对反射回来干涉光谱信号的解调、参考温度和压力的标定曲线及温度压力解调算法,可以分析得出当前井下温度和压力的实时数据。

3.1.2 井下多相流量传感器的原理

井下多相流量传感器的测量原理是通过对流体混合物声速的测量和流体流速的测量,以及对被测温度和压力下流体各相密度及声速的了解,得出在两相流系统中各相流量。

声速测量系统是光纤分布式声波系统,该系统是基于光纤中瑞利散射的强度型干涉系统。光在通过不均匀介质时一部分光偏离原方向传播的现象即为光的散射。光纤中三种主要的散射为:瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射。其中瑞利散射光与入射光的波长一致,且强度最强;而布里渊散射光和拉曼散射光波长相对入射光的波长长,发生不同程度的偏移。通过不同的波长区域可互相区分开。当声波振动作用于光纤时,由于弹光效应,光纤的折射率和长度发生微小变化,导致光纤内传输光的相位变化,使得光强也会发生变化。检测振动前后的瑞利散射光信号的强度变化,可实现声波振动的

探测及定位。

在生产过程中,流体在地层及井筒的流动、井下电泵的运转等均会产生不同程度的井下声音扰动,这些声音扰动的频率不同,通过各种数理运算可以将所需要的频率区分开来,通过监测生产过程中产生的声音扰动来进行流体声速计算,再根据方程通过声速求出相持率与流量^[15]。

$$\varphi_g + \varphi_w + \varphi_o = 1 \quad (1)$$

$$\rho = \rho_g \varphi_g + \rho_w \varphi_w + \rho_o \varphi_o \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho v^2} = \frac{\varphi_g}{\rho_g v_g^2} + \frac{\varphi_w}{\rho_w v_w^2} + \frac{\varphi_o}{\rho_o v_o^2} \quad (3)$$

式中: φ_g 、 φ_w 、 φ_o 分别表示含气率、含水率和含油率; ρ 、 ρ_g 、 ρ_w 、 ρ_o 分别表示流体混合物、气、水、油相的密度, mg/L ; v 、 v_g 、 v_w 、 v_o 分别表示混合物、气、水、油中的声速 m/s 。

常温常压下,声波在原油、天然气、水的传播速度具有明显差异,可以有效区分不同介质的声速,通过取样,实验室内模拟井下温度和压力环境,测试油、气、水的声速与压力和温度的关系,建立标准图谱。同时,模拟不同油气水比例下的混合流体声速与压力和温度的关系,建立标准图谱。根据上述方程式,可利用实测数据确定各相的持率;通过图谱中两条声速带的插值,可计算出本底声速,结合防砂筛管或井眼尺寸可得到相应的流量。

3.2 传感器的研发及现场应用案例分析

基于以上原理,利用各种材质制作压力传感器及多相流量传感器,经实验室验证,利用蓝宝石材质制作压力传感器能够有效降低压力数据漂移问题。根据产出剖面的解释原理制作光纤分布式声波在线监测系统光纤和蓝宝石温度压力监测系统,通过与耐高温的井下铠装光缆及传感器建立连接,即可对井下声波信息进行实时在线监测。对井下声波场信息和温压信息加以分析利用,可以得到水平段的实时的产出剖面信息。为了更为直观的实现相关数据的实时显示及解释,编制分布式光纤井下多相流监测成果显示系统。

国内首次应用的分布式光纤井下多相流监测系统在西江B油田B20井应用成功,这标志着复杂井永久监测和产出剖面测试技术研究获得成功。该系统通过激光蚀刻技术在光纤上植入等距离传感器,下入到水平井水平段。地面发射高频率激光,当井下流体流动声波信号传播至传感器时,传感器拾取信号并反射至光电监测仪,将水平段采集

的流量及含水率按每米一个点的数据实时传输到平台监控系统,最终获得水平段产出剖面和含水率等参数(图 3),经过与地面实时流量对比证明该技术可行(图 4)。南海东部地区所钻井大部分是水平井,井型复杂,要对水平段进行分段流量和含水率监测十分困难,目前国内外还没有成熟的实时监测设备。这一技术将为水平井堵水挖潜提供理论依据,为深水油气开发水下计量和监测提供数据,填补了国际在这一技术领域的空白。

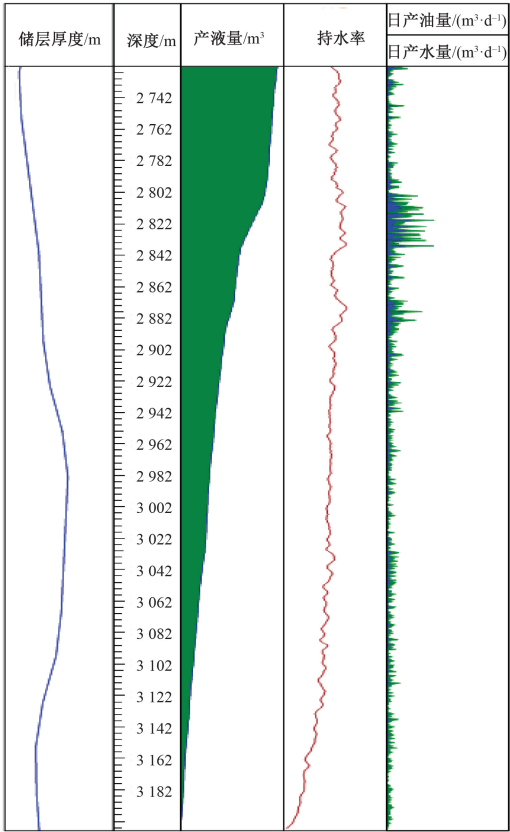


图 3 B20 井水平段产出剖面实时监测结果
Fig. 3 Real-time monitoring example of horizontal section production profile in well X23-A20H1

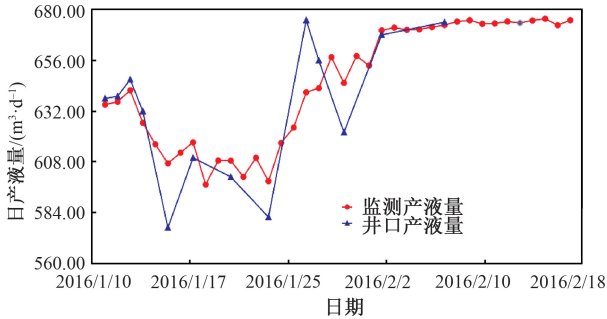


图 4 B20 井光纤监测系统监测流量与井口计量结果对比
Fig. 4 Flow rate comparisons between wellhead metering and optical fiber monitoring system in well X23-A20H1

3.3 技术优点及存在的问题

- (1) 相对于送入式产液剖面监测方法, 光纤式产液剖面监测具有无需动用管柱、操作简单、不会出现遇阻遇卡现象, 且能够实现永久式产液剖面 and 温压监测的目的, 是未来产液剖面测试的趋势。
- (2) 蓝宝石压力计能够有效规避普通测压装置的压力数据偏移问题, 提高测压装置的稳定性, 但是其核心配件蓝宝石受各种军事管制等因素的影响, 无法批量生产, 需要寻求其他物质进行替换。
- (3) 相对于送入式产液剖面监测装置, 该装置采用解释算法自动生成水平井段的产液剖面, 但是考虑该技术对储层流体的解释精度低于送入式产液剖面监测设备, 其产液剖面需要增加修正算法。

4 水平井产液剖面示踪剂监测技术

水平井产液剖面示踪剂监测技术是通过将多种缓释型油溶性和水溶性固体示踪剂在地面提前安装在水平段不同目标点的分段完井管柱上, 示踪剂随管柱一并下入井内, 其中油溶性示踪剂遇油发生释放, 遇水稳定, 水溶性示踪剂反之; 通过测试油井生产过程中各种示踪剂的产出情况, 从而分析水平段的产液剖面信息的一种测井方法。

4.1 基本原理

4.1.1 示踪剂缓释原理

缓释型示踪剂是将示踪物质与聚合物混合后交联成型, 作为骨架存在的聚合物能够减缓示踪剂的释放速度, 示踪物质在油藏条件下, 通过扩散作用缓慢释放到油或水中。实验室证明, 示踪剂释放速度与温度、接触流体性质、接触面积有关, 受压力、冲刷等因素影响不大^[16-18]。

4.1.2 水平井产液剖面示踪剂监测技术基本原理

水溶性示踪剂和油溶性示踪剂具有不同的物理性质和监测方法, 相对于油溶性示踪剂, 水溶性示踪剂的释放速度更快, 出水点水流会对该点水溶性示踪剂进行冲刷, 从而引起水溶性示踪剂的释放, 因此, 可以根据水溶性示踪剂的浓度判断各水平段的产水量^[19-21]。

油溶性示踪剂的产出剖面解释方法分为达到时间法和冲刷斜率法, 其基本原理如下:

(1) 到达时间法

因油溶性示踪剂释放速度相对较慢, 为达到准确的测试效果, 通常在测试前关井 24 h 以上, 由于井筒内充满液体, 在关井阶段示踪剂发生释放, 含

油富集区周围形成示踪剂的聚集区;油井开井后,聚集的示踪剂会进入井筒主流道中,并随液流到达取样口;通过在取样口分析各段示踪剂到达井口的时间,结合油井井口测试产量以及井筒体积即可求出各段的产液贡献,该方法对于示踪剂距离较短时存在一定的误差。

假定水平段分为两段,每一段的流量分别为 Q_1 和 Q_2 , 则达到时间分别为:

$$Q = \frac{V}{t_1} \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{\pi r^2 d}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

$$Q_1 = Q - Q_2 \quad (6)$$

式中: Q 、 Q_1 、 Q_2 为油井的流量、第一段流量、第二段流量, m^3/d ; V 为第一水平段距离取样口的容积, m^3 ; r 为水平段井筒半径, m ; d 为第一段与第二段的距离, m ; t_1 、 t_2 分别为第一段和第二段示踪剂波峰出现时间, d 。

不同水平段的示踪剂到达取样口的时间与液量具有明显的关系,通过记录每一段示踪剂波峰的到达时间即可确定各个水平段内流体流量。

(2) 冲刷斜率法

通过室内实验发现,关井后油溶性示踪剂浓度聚集,开井生产后,示踪剂被冲至主流道,液量越大,示踪剂浓度聚集区被冲到主流道中越快,示踪剂浓度峰值下降段下降速度越快:

$$C(t) = C(0) \times e^{-f(Q_1)t} \quad (7)$$

式中: $C(0)$ 为开井前示踪剂周围的聚集浓度, mg/L ; t 表示开井时间; $f(Q_1)$ 与冲刷流量的大小成正比; $C(t)$ 为开井 t 时间示踪剂周围的聚集浓度, mg/L 。

通过以上公式确定后续仅需对产出曲线的下降段进行拟合,得到各种示踪剂 $f(Q_1)$, 即得所代表段的斜率,通过计算斜率占总斜率的比例即可得到各段的产量贡献,该方法解决了到达时间法难以区分峰值时间的问题。

4.2 应用案例分析

基于以上原理,模拟地层条件下的温压环境,并考虑地层流体的本底浓度,制作并筛选出缓释周期长达 2 年的 5 种油溶性示踪剂和 5 种水溶性示踪剂。

国内首次应用的水平井产出剖面示踪剂永久监测技术在流花 A 油田 A3 井应用成功。为提高示踪剂的监测精度,对比条状、涂敷状、圆环状等不同形状示踪剂的缓释效果,制作出适合流花 A 油田的

条状缓释型固体示踪剂,并安装到改良型的示踪剂监测管柱下入到 A3 井中(图 5)。

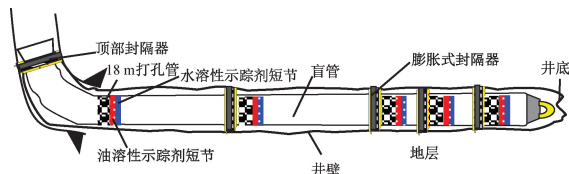


图 5 水平段产液剖面示踪剂完井管柱图

Fig. 5 The completion string of production profile tracer monitoring in well L11-C7H3

该生产管柱示踪剂用量少、且示踪剂之间保持一定距离可保证不同示踪剂到达时间有一定的延迟,提高解释精度,此外还兼具一定的控水功能。A3 井清井返排结束并投产后,关井 24 h 启井取样,以 5 min/个的取样频率完成启井后 3 d 的油井产出液样品,在实验室对样品进行分析化验,获得每个时间点的示踪剂浓度(图 6)。

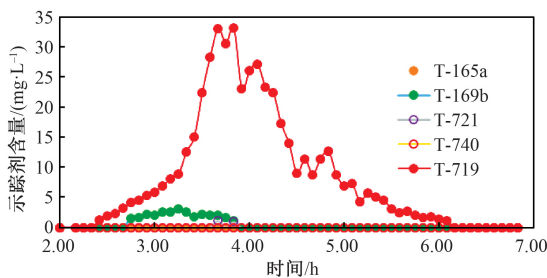


图 6 单井油溶性示踪剂浓度采样分布图

Fig. 6 Oil soluble tracer sampling distribution in well L11-C7H3

由图 6 可知,油溶性示踪剂具有明显的峰值特征,可以利用示踪剂含量峰值达到时间和示踪剂峰值下降速度来确定每段的日产液量,趾端 T719 示踪剂返出量最大,其次为跟端 T-169b、中间端 T721 少量返出,其他位置无返出。水溶性示踪剂基本呈现等量返出特征,曲线之间基本保持平行(图 7),可以通过比例计算产出水比例,最终解释结果见表 1,表明趾段和跟端产出较多,且以趾段含水最低。

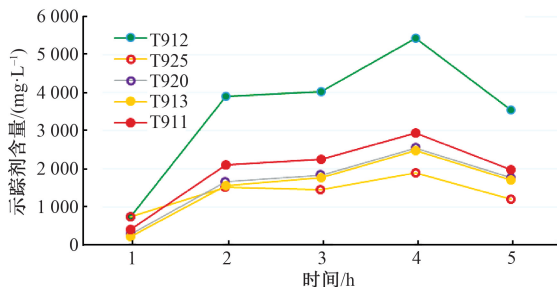


图 7 单井水溶性示踪剂浓度采样分布图

Fig. 7 Water soluble tracer sampling distribution of in well L11-C7H3

表 1 流花 A 油田 A3 井第一次示踪剂取样解释成果表
Table 1 Interpretation results of the first tracer sampling in well L11-C7H3

项目	第一段 (跟端)	第二段	第三 段	第四 段	第五段 (趾段)	备注
是否产油	是	否	几乎 不产	否	是	(1) T721 段 近似为全部
是否产水	是	是	是	是	是	产水。(2)脚 尖,脚跟主要
产液比例/%	43	3	3	3	48	产液,中间三
产液量/(bbl·d ⁻¹)	676	45	47	40	752	段未动用。
产水比例/%	35.2	15.5	16.2	13.6	19.4	(3)脚跟处产
产水量/(bbl·d ⁻¹)	102	45	47	40	56	水比例最高。
含水/%	15.1		100		7.4	

为了验证解释成果的准确性,当年在该井趾段 120 m 处新钻调整井 A4 井,投产前 15 个月含水保持在 10% 以下,开发效果较好。后续通过 2 年累计五次的连续监测,证明该技术能够达到水平井找水的目的,且 A3 井的开发效果远好于距离 150 m 的 10 年前的老井。

4.3 技术优点及存在的问题

与常规送入式水平井产液剖面测井和永久式光纤产液剖面测井技术相比,现场实施后确定示踪剂监测水平井产液剖面技术具有以下优势:

(1)示踪剂随完井管柱下入井内,测试过程无需动用管柱,无额外工具,无作业风险,且可实现测试控水一体化,但存在完井成本高的问题。

(2)测试简单,且测试成本低,但因流体流动的复杂性、取样精度及实验室分析的不确定性,存在测试精度低的问题。

(3)示踪剂使用量较小,不会对油田外排水水质造成影响,不影响油井正常生产。

(4)示踪剂具有缓释性能,可长期监测,其中油溶性示踪剂可缓释 2 年以上,水溶性示踪剂遇油稳定,油井见水后,可缓释 2 年以上。

5 结论及建议

(1)永置式水平井产液剖面监测手段逐渐成为南海东部地区水平井产液剖面监测的主要方法。南海东部从电学、声学、光学等角度开展研究,形成了水平井产出剖面光纤监测技术和示踪剂监测技术。

(2)水平井送入式产液剖面监测方法能够准确获得水平段的产出剖面,但存在作业安全风险大、对井筒条件要求高、仪器稳定性差易遇卡等问题,后续需要在仪器稳定性等方面进行改进,提高作业的成功率。

(3)经矿场应用证明,光纤分布式声波传感和缓释型示踪剂两种水平井水平段流量和含水的实时和永久监测方法是可行的。对无测试作业条件的水平井(如结构复杂和井况差的水平井、水下井口的水平井、测试难度大的深水油气田生产井等)尤其具有较好的应用前景。

(4)基于光纤分布式声波传感的水平井产出剖面监测方法较好地实现了空间上和时间上的连续监测,空间分辨率为 1 m(即可监测每米水平段的流量),监测时间间隔 ≤ 1 min,传感器达到纳应变级别。该项技术填补了国内空白、处于国际领先水平,所研制的温度压力传感器为国际上首次采用双法帕腔传感器结构和单晶蓝宝石焊接,其蓝宝石封面平面研磨技术属世界领先水平。

(5)油溶性和水溶性缓释型示踪剂监测技术可以实现水平井油水产出剖面的空间与时间上相对连续的监测。空间上取决于完井封隔分段数,时间上可以实现 2~3 年的监测,监测频率取决于取样频率。

致谢:中海石油(中国)有限公司深圳分公司为水平井产出剖面永久监测技术落地提供了技术支持,并对本文提出了修改建议,在此表示感谢。

参考文献

[1] 高晓飞,罗东红,闫正和,等.一种减缓底水锥进的新方法——中心管技术及其在西江 23-1 油田水平井开发中的应用[J].中国海上油气,2010,22(2):114-118.
GAO Xiaofei,LUO Donghong,YAN Zhenghe,et al. A new method for delaying coning in bottom water reservoir application of stinger technology in horizontal well development of XJ23-1 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas,2010,22(2):114-118.

[2] 张波,黄长穆.中国南海流花 11-1 油田的深水开发技术[J].中国海上油气(工程),1998,10(3):36-37.
ZHANG Bo,HUANG Changmu. Deep water development technology of Liuhua 11-1 oilfield in the South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1998, 10(3): 36-37.

[3] 刘远志.珠江口盆地薄油层自流注水案例分析[J].西部探矿工程,2020,32(1):40-42,45.
LIU Yuanzhi. Case analysis of artesian water injection in thin reservoirs in the Pearl River Mouth Basin [J] West-China Exploration Engineering,2020,32(1):40-42,45.

[4] 宁玉萍,陈维华.底水油藏水平井中心管、ICD 完井工艺技术[J].中外能源,2014,19(2):40-43.
NING Yuping,CHEN Weihua. Pipe base and ICD completion technique of the horizontal wells in the bottom water reservoir [J]. Sino-Global Energy,2014,19(2):40-43.

- [5] 邵立民. 国内外水平井生产测试技术[J]. 油气井测试, 2016, 25(1): 73-74.
SHAO Limin. Production test technology to horizontal well at home and abroad[J]. Well Testing, 2016, 25(1): 73-74.
- [6] 朱洪征, 郭靖, 黄伟, 等. 低液量水平井存储式产液剖面测井技术与应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(6): 50-52.
ZHU Hongzheng, GUO Jing, HUANG Wei, et al. Development and application of memory type fluid production profile logging technology in low liquid output horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(6): 50-52.
- [7] 邹顺良, 杨家祥, 胡中桂, 等. FSI 产出剖面测井技术在涪陵页岩气田的应用[J]. 测井技术, 2016, 40(2): 209-213.
ZOU Shunliang, YANG Jiaxiang, HU Zhonggui, et al. Application of FSI production profile logging technique in Fuling shale gas field [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(2): 209-213.
- [8] 王国锋, 吴玲, 刘婷. Flow Scanner 新型水平井生产测井仪[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 33-36.
WANG Guofeng, WU Ling, LIU Ting. Flow Scanner: A new flow tool for production logging in horizontal wells [J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(2): 33-36
- [9] 郭海敏, 戴家才, 陈科贵. 生产测井原理与资料解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 209-210.
- [10] SVEIN MJAALAND. Wireless inflow monitoring in a subsea field development: A case study from the hyme field, offshore mid-norway. APE170619MS, 2014.
- [11] 付晓松, 姚艳华, 王德有, 等. 光纤井下监测技术装备及应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(3): 69-70.
FU Xiaosong, YAO Yanhua, WANG Deyou, et al. Instrument & equipment • equipment and application of underground monitoring tech of optical fiber[J]. Well Testing, 2010, 19(3): 69-70
- [12] 贾振甲, 孙达, 李方宇, 等. 致密油储层试油分布式光纤传感监测技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 58-65.
JIA Zhenjia, SUN Da, LI Fangyu, et al. Monitoring technique involving distributed optical fiber sensor for well testing in tight oil reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 58-65.
- [13] 汤敬. 分布式光纤光栅应变和温度同时测量的系统研究[D]. 燕山大学, 2004.
TANG Jing. Study on the distributed FBG system for simultaneous measuring strain and temperature[D]. Yanshan University, 2014.
- [14] 李晗, 张波涛, 王俊杰, 等. 光纤光栅传感器振动与温度信号解耦[J]. 上海交通大学学报: 1-9.
LI Han, ZHANG Botao, WANG Junjie, et al. Decoupling of vibration and temperature signals of fiber bragg grating sensor[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-9
- [15] 闫正和, 罗东红, 唐圣来, 等. 基于光纤分布式声波传感的井下多相流测试研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 9-12.
YAN Zhenghe, LUO Donghong, TANG Shenglai, et al. Study on down-hole multiphase flow measurement system based on fiber distributed acoustic sensor [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 9-12.
- [16] 武波. 示踪剂技术在油田开发中的应用研究[J]. 化学工程师, 2018, 32(11): 62-64.
WU Bo. Application research of tracer technology in oilfield development [J]. Chemical Engineer, 2018, 32(11): 62-64.
- [17] 黄波, 易飞, 陈维余, 等. 海上油田微量物质示踪剂技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [18] 周珊珊. 葛根素固体分散体及骨架缓释片的研制[D]. 西南交通大学, 2013-5-1.
ZHOU Shanshan. Preparation of puerarin solid dispersion and puerarin sustained-release tablets [D]. Southwest Jiaotong University, 2013-5-1.
- [19] 温守国, 谢诗章, 黄成, 等. 缓释型长效固体示踪剂研究[J]. 天津科技, 2018, 45(6): 82-85.
WEN Shouguo, XIE Shizhang, HUANG Cheng, et al. Study on long-term slow-releasing solid tracer [J]. Tianjin Science & Technology, 2018, 45(6): 82-85.
- [20] 邸德家, 郭肖, 何祖清, 等. 智能示踪剂产出剖面测试技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(4): 44-49.
DI Dejia, GUO Xiao, HE Zuqing, et al. Intelligent tracer production profile testing technology [J]. Well Testing, 2021, 30(4): 44-49.
- [21] 王强, 景成, 俞保财, 等. 水平井中固体示踪剂缓释特性实验分析[J]. 测井技术, 2021, 45(1): 16-22.
WANG Qiang, JING Cheng, YU Baocai, et al. Experimental analysis on slow release law of solid tracer for horizontal wells[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(1): 16-22.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 闫正和, 男, 1965 出生, 教授级高级工程师, 主要从事油气田开发工作。电话: 0755-26022393, 15986664081; Email: yanzhh@cnoc.com.cn。通信地址: 深圳市南山区后海滨路(深圳湾段)3168 号中海油大厦 A 座, 邮政编码: 518000。