

# 生产测井与试井联合作业技术

王峻岭

中国石油长城钻探工程公司国际测井公司 北京 100101

通讯作者:Email:wangjunling@cnlc.cn

引用:王峻岭. 生产测井与试井联合作业技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(2): 51-55.

Cite: WANG Junling. Combined operation technology of production logging and well testing [J]. Well Testing, 2021, 30(2): 51-55.

**摘要** 伊拉克 H 油田主力层 M 受层间非均质性等影响,开发过程中层间矛盾突出,单纯的生产测井技术只能监测井筒动态,无法实现对油藏的评价。根据不稳定试井理论,基于传统生产测井仪器,对生产测井作业过程进行优化,提出一套综合运用压力、产能、物性资料,动静态资料相结合进行油藏动态分析及评价的有效方法。定向井 F-1 井运用该方法定量评价了不同工作制度下的产液剖面及其产能变化规律,以及试井解释渗透率、井底污染及油藏物性等参数,实现了井筒流动与油藏评价的结合。该技术对揭示层间干扰、分析油藏动态特征、评价油藏物性具有重要的意义。

**关键词** 生产测井;试井;工作制度;联合作业;渗透率;层间干扰;油藏评价

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.010

## Combined operation technology of production logging and well testing

WANG Junling

International Logging Company, CNPC Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd., Beijing 100101, China

**Abstract:** Due to the influence of interlayer heterogeneity, the main reservoir M of H Oilfield in Iraq has the problem of prominent interlayer contradiction in the development process. The production logging technology can only monitor the wellbore performance and cannot realize the reservoir evaluation. Based on the traditional production logging tools and transient well testing theory, the production logging operation process is optimized, and an effective method for reservoir dynamic analysis and evaluation is proposed by comprehensively using pressure, production capacity, physical property data and combining dynamic and static data. In directional Well F-1, this method is used to quantitatively evaluate the fluid production profile and its productivity variation law under different working systems, as well as the permeability of well test interpretation, bottom hole pollution and reservoir physical properties, so as to realize the combination of wellbore flow and reservoir evaluation. This technology is of great significance to reveal interlayer interference, analyze reservoir dynamic characteristics and evaluate reservoir physical properties.

**Keywords:** production logging; well test; working system; joint operation; permeability; interlayer interference; reservoir evaluation

伊拉克 H 油田主力层 M 为稳定的生物碎屑灰岩,泥质含量低,孔隙度大,但孔隙结构复杂,基本为中高孔-中低渗储层<sup>[1]</sup>。其中 M1 层纵向非均质性强;M2 层溶蚀程度高,大孔隙发育<sup>[2-3]</sup>。M 层开发方式为多层合采,随着生产的进行,各层动用程度不一,层间矛盾日益突出,对动态监测手段提出了更高的要求。

生产测井和试井是油藏管理的重要组成部分<sup>[4]</sup>。生产测井(PLT)可以同时获取流量、持水率、密度、压力、温度等多种动态信息,是监测井筒生产动态的重要手段<sup>[5-6]</sup>。通过生产测井可以获取油水井生产过程中的剖面情况,了解油水井的有效供液

层段或有效吸水层段<sup>[7]</sup>。但是由于生产测井只关注井筒流动,应用场景单一,应用范围有限,具有一定的技术局限性。现代试井分析是研究井底污染、渗透率、储层连通性及产能的重要方法,是油藏工程的重要组成部分<sup>[8-9]</sup>,其通过产量和井底压力的变化进行分析,运用双对数诊断曲线对油藏物性进行评价<sup>[10-11]</sup>。试井解释是处理反问题的过程,具有多解性强的特点,而生产测井能够提供准确的产量和产层数据,可以有效的降低试井解释的多解性,二者相互结合在油藏动态评价方面具有很好的互补性<sup>[12-13]</sup>。吴铭德<sup>[14]</sup>、戴家才<sup>[15]</sup>提出了用油田生产测井资料确定储层参数的理论,拓宽了生产测井

的应用场景。白建平等<sup>[16]</sup>、Sullivan M. J. 等<sup>[17]</sup>、宋红伟等<sup>[18-19]</sup>提出了变流量生产测井的地层参数确定方法,对生产测井和试井相结合的尝试提供了思路。前人提出的方法大多基于生产测井结果进行分析,缺乏与不稳定试井理论的结合,方法比较单一。本文在分析各种方法技术的基础上,通过优化生产测井作业过程,提出了多工作制度生产测井与不稳定试井联合作业技术,实现了生产测井和试井、井筒和油藏的结合。在此基础上,提出了一套综合运用压力、产能、物性资料,动静态资料相互结合进行油藏动态分析及评价的有效方法,并以伊拉克 H 油田为例,阐述了具体应用过程,通过现场应用验证该技术的可行性,在跨学科方法技术方面做出了有益尝试,同时也对类似多层碳酸盐岩油藏动态监测具有借鉴意义。

## 1 作业优化

多工作制度 PLT 测井与不稳定试井联合作业工艺包括多工作制度 PLT 测井资料的录取和试井资料的录取两部分。多工作制度生产测井是指通过改变油嘴大小或者抽油机频率导致油井流量变化,通常选取三个或以上油嘴和至少一个关井点,分别进行 PLT 测井作业。在改变油嘴后,油井需要一定的生产时间达到稳定状态。利用两次 PLT 测井的等待时间,把 PLT 仪器下放至井底中某个固定深度进行井底压力的监测,得到不同油嘴及关井条件下井底压力的变化。图 1 为三个油嘴和一个关井条件下的联合作业示意图。

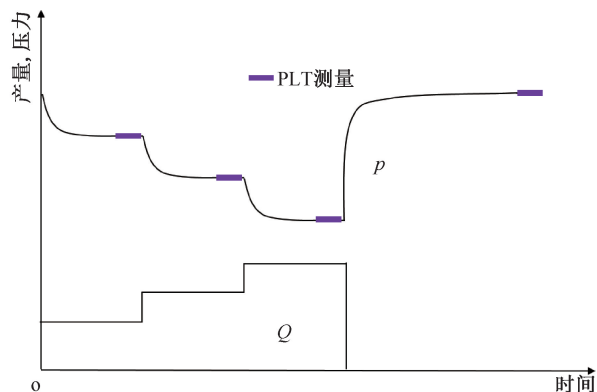


图 1 PLT 测井与试井联合作业示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined operation of PLT logging and well testing

运用 SIP (Selective Inflow Performance) 方法,对不同工作制度下的产能变化规律进行研究,关井 PLT 测量用于评价井底窜流情况<sup>[20-22]</sup>。井底压力

的变化可以进行不稳定试井分析,从而对表皮系数、渗透率及边界情况进行评价。PLT 测井与试井资料录取两部分交替进行、相互衔接、互不干扰,实现了有效节省作业时间并录取多种动态资料。

为了保证试井资料的质量,生产测井应在油井达到拟稳态条件下进行,测井过程中应避免对油嘴进行不必要的操作。其次,在录取井底压力时,要求 PLT 仪器停在同一深度,且井底压力务必覆盖油嘴调整、地面关井等关键时间节点。

多工作制度生产测井与试井联合作业不但具有传统生产测井及试井的特点,还具有以下优势:(1)评价不同工作制度下油井的产液剖面及其变化趋势;能够运用 SIP 方法评价各油藏的产能,地层压力;(2)为油井合理工作制度优化提供直观的参考;(3)运用现代试井解释方法评价井筒完善情况及储层物性的变化规律;(4)生产测井与试井相结合不但提高了作业时效,同时 PLT 测井也为试井提供了精确的产量数据和有效厚度信息,提高了试井解释的精度;(5)可以综合运用生产测井、试井等动态资料并结合测井等静态资料,分析开发过程中的层间干扰,加深对层间矛盾规律的认识,为油藏高效开发提供科学依据与指导。

## 2 现场应用情况

F-1 井为伊拉克 H 油田一口定向井,生产层位 M1: 3 031.0~3 101.6 m, M2: 3 125.0~3 147.0 m、3 154.4~3 178.0 m,为多层合采。该井先后选取了 22.23 mm、25.40 mm、28.58 mm 三个油嘴进行 PLT 测井,之后地面关井,并在关井 24 h 之后再次进行 PLT 测井。在每次 PLT 测井的作业间隙,PLT 仪器下放到 3 198.0 m 记录井底压力,得到的井底压力变化如图 2 所示,其中空白处为 PLT 测井作业。

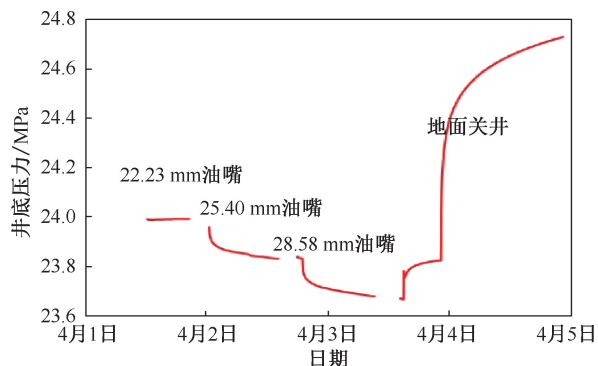


图 2 F-1 井实测压力曲线图

Fig. 2 Measured pressure curve of Well F-1

结合常规测井数据,对 F-1 井产液剖面进行分析,该井产纯油。M1 层纵向非均质性较强,有效产层比较分散,且单个小层产能较低,产量占比小于

40%;M2 为主力产层,占总产油量的 60%以上,产层主要分布 M2 层上部,在常规测井曲线上体现为大孔隙、高电阻、物性较好的层段,如图 3 所示。

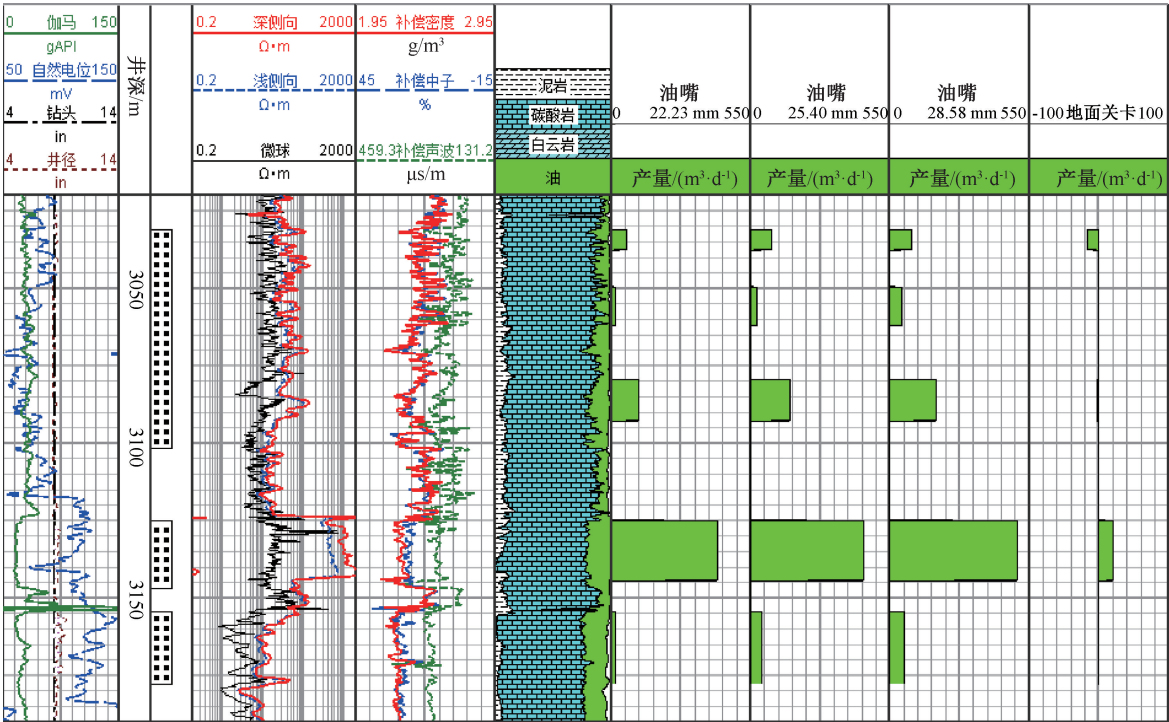


图 3 F-1 井 PLT 产液剖面图  
Fig. 3 PLT production profile of Well F-1

关井 24 h 后,井底由 M2 到 M1 层存在少量的层间窜流。运用 SIP 方法,通过三个油嘴下的井底压力、产量数据,可以确定 M1、M2 两层的平均油藏压力、采油指数和无阻流量(图 4、表 1)。可知,M2 层油藏压力明显高于 M1,但两层 IPR 曲线斜率基本一致,说明两层产能大小相近。两层同一工作制度下产量的差异主要是地层压力差导致。在两层合采过程中,同一压力系统下的 M1、M2 层由于物性的差异导致压力衰竭程度不同,进而形成不同的压力系统导致层间干扰。油藏压力的变化与 F-1 井关井状态下的窜流特征相吻合。

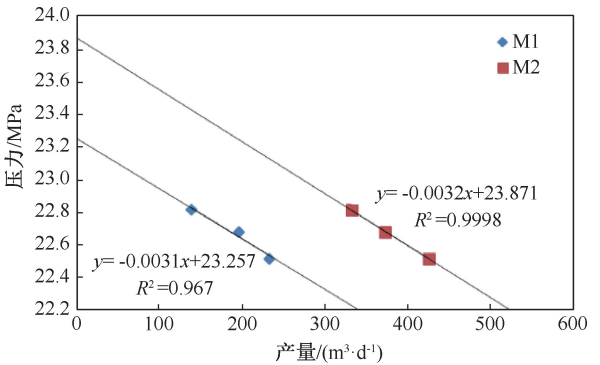


图 4 F-1 井 SIP 分析图(折算到 3198 m)  
Fig. 4 SIP analysis of Well F-1 (Converted to 3198 m)

表 1 F-1 井 SIP 分析解释结果  
Table 1 SIP analysis results of Well F-1

层位	射孔层/ m	基准深度/ m	油藏压力/ MPa	采油指数/ ( $\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{MPa})^{-1}$ )	无阻流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
M1	3 031.0~3 101.6	3 198	23.26	325.2	4 770.9
M2	3 125.0~3 147.0 3 154.4~3 178.0	3 198	23.87	315.0	4 942.8

对测井过程中录取的井底流压及压力恢复资料进行现代试井解释,得到了 F-1 井的双对数试井曲线(图 5)。该井表皮系数为-4.1,酸化后为超完

善井。压力导数曲线径向流明显,后期导数有轻微的上翘,指示该层储层物性在平面上具有逐步变差的趋势。另外,PLT 测井提供了精确的产量和有效

供液厚度数据。由于该数据是在油井生产条件下获取的动态数据,相比传统试井解释所使用的产量和有效厚度更加精确,能够得到更加精确的储层渗透率数据(表 2)。

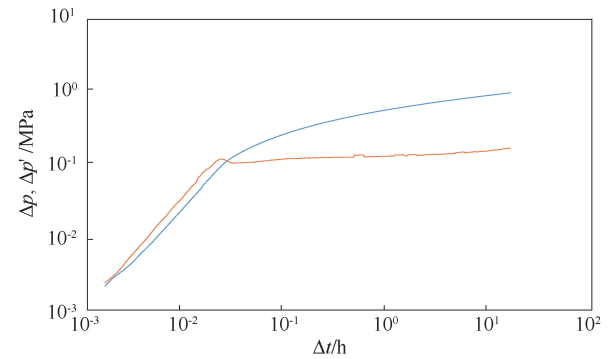


图 5 F-1 井双对数曲线图  
Fig. 5 Double logarithm curve of Well F-1

表 2 F-1 井不同解释方法结果对比

Table 1 SIP analysis and interpretation results of Well F-1

解释方法	不同油嘴地面计量和 PLT 解释产油量/( m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )			有效 厚度/ m	渗透率/ ( 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )
	22. 23 mm	25. 40 mm	28. 58 mm		
传统试井	519	600	680	116. 2	174
PLT 试井	472	569	659	71. 1	286

通过大量常规测井及 PLT 测井指示 M1、M2 层具有明显的物性差异,随着合层开发的进行,层间矛盾逐步显现。而通过合采过程中的试井解释分析,压力导数曲线虽稍有波动,但总体比较平直,具有明显的径向流特征,指示在油藏内部,该井渗流体现为近似均质的特征:一方面这是由于 PLT 测井受限于井筒内流动剖面的监测,无法探测到油藏内部的流动状态;另一方面也说明了 M1、M2 两层虽然在物性上具有明显的差异,但两层在油藏一定范围内的渗流特征又表现出均质性。

3 结论

(1)生产测井与试井联合作业技术扩展了生产测井的应用范围,实现了井筒监测和油藏评价的结合,提升了对碳酸盐岩油藏层间干扰及产能变化规律的认识,在跨学科方法技术方面做出了有益尝试,丰富了动态监测的手段,对分析油藏动态特征、评价油藏物性、调整开发策略、指导油气田开发过程具有重要的意义。

(2)在伊拉克 H 油田多层合采井中,建议有计划、系统的安排生产测井与试井联合作业。

(3)层间干扰受到临井、边界等多种因素影响,

要准确的了解其变化规律,还需要结合其他动态资料做大量细致的研究。

致谢:感谢长城钻探工程公司国际测井公司同意本文公开发表;感谢胡友良经理等人在论文修改、指导方面做出的贡献。

参考文献

[1] AL-DABBAS M, AL-JASSIM J, AL-JUMAILY S. Depositional environments and porosity distribution in regressive limestone reservoirs of the Mishrif Formation, Southern Iraq [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2010, 3(1): 67-78.

[2] KONERT G. The petroleum geology of Iraq [J]. Journal of Petroleum Geology, 2010, 33(4): 405.

[3] SADOONI F N. The nature and origin of upper cretaceous basin-margin rudist buildups of the Mesopotamian basin, southern Iraq, with consideration of possible hydrocarbon stratigraphic entrapment [J]. Cretaceous Research, 2005, 26(2): 213-224.

[4] 谢荣华. 国内油田动态监测技术新进展及发展方向 [J]. 测井技术, 2007, 31(2): 103-106.

XIE Ronghua. Recent progress and orientation of oilfield dynamic monitoring technologies in China [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(2): 103-106.

[5] 郭海敏. 生产测井导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 104-105.

[6] 李得信, 张洪, 方惠军. 涩北气田动态监测技术 [J]. 油气井测试, 2012, 21(3): 46-48, 51.

LI Dexin, ZHANG Hong, FANG Huijun. The dynamic monitoring tech in Sebei gas field [J]. Well Testing, 2012, 21(3): 46-48, 51.

[7] 梁倚维, 王东, 田发国, 等. 基于生产测井的多层试井解释技术 [J]. 天然气工业, 2017, 37(10): 54-58.

LIANG Yiwei, WANG Dong, TIAN Faguo, et al. Multilayer well test interpretation technology based on production logging [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(10): 54-58.

[8] 刘能强. 实用现代试井解释方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 21-25.

[9] 曹朋亮, 杨小松, 张一果, 等. 致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法” [J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 1-8.

CAO Pengliang, YANG Xiaosong, ZHANG Yiguo, et al. “Single point” productivity evaluation method for horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 1-8.

[10] 田新建, 廖伟伟, 补璐璐, 等. 利用“异常”试井曲线分析油水井工程问题 [J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 67-72.

TIAN Xinjian, LIAO Weiwei, BU Lulu, et al. Utilizing



- the “abnormal” well test curve to analyze the engineering problems in oil and water wells [J]. *Well Testing*, 2018, 27(4):67-72.
- [11] 万玉金,钟世敏,王小鲁,等. 利用产气剖面精细描述多层气藏动态特征[J]. *油气井测试*, 2018, 27(3):72-78.
- WAN Yujin, ZHONG Shimin, WANG Xiaolu, et al. Using gas production profile to describe the dynamic characteristics of multilayer gas reservoirs [J]. *Well Testing*, 2018, 27(3):72-78.
- [12] 白建平,田中原,闫伟林. 利用试井和生产测井资料估算注水开发过程中储层剩余油饱和度[J]. *油气井测试*, 2005, 14(4):16-18.
- BAI Jianping, TIAN Zhongyuan, YAN Weilin. Estimating the remaining oil saturation from well test and production well logs during injecting water development [J]. *Well Testing*, 2005, 14(4):16-18.
- [13] 黄泽艳,张维平,金铁山. 用生产测井资料确定油水井注采关系方法及效果评价[J]. *测井技术*, 2000, 24(6):466-469.
- HUANG Zeyan, ZHANG Weiping, JIN Tieshan. A method for determining the relation between injection and production of injection & oil production wells with production log data and its effect appraisal [J]. *Well Logging Technol*, 2000, 24(6):466-469.
- [14] 吴铭德. 生产测井的新领域——确定地层参数[J]. *地球物理测井*, 1990, 14(1):39-46.
- WU Mingde. A new area of production logging——Formation parameter determination [J]. *Geophysical Well Logging*, 1990, 14(1):39-46.
- [15] 戴家才. 用油田生产测井资料确定产层参数的方法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2003.
- DAI Jiakai. Method research of determining production layer parameters by production logging data of oilfield [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2003.
- [16] 白建平,田中原,闫伟林. 利用试井和生产测井资料估算储层的动态渗透率[J]. *油气井测试*, 2007, 16(1):1-3.
- BAI Jianping, TIAN Zhongyuan, YAN Weilin. Estimation of dynamic permeability from data of well test and production well logs [J]. *Well Testing*, 2007, 16(1):1-3.
- [17] SULLIVAN M J, BELANGER D L. Permeability from production logs-method and application [J]. *SPE* 102894, 2006.
- [18] 宋红伟,张昌民,郭海敏,等. 用油田生产测井资料确定产层动态渗透率的方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(3):970-973.
- SONG Hongwei, ZHANG Changmin, GUO Haimin, et al. Method research of determining production layer dynamic permeability by production logging data of oilfield [J]. *Progress in Geophys*, 2009, 24(3):970-973.
- [19] 宋红伟,郭海敏,戴家才. 变流量生产测井在确定动态地层参数中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(7):80-84.
- SONG Hongwei, GUO Haimin, DAI Jiakai. Determining dynamic formation parameter through variable flow-rate production logging [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(7):80-84.
- [20] BOURDET D. Pressure behavior of layered reservoirs with crossflow [J]. *SPE* 13628, 1985.
- [21] ASAD I, SAFWAN A, JAWAD A. Determining average reservoir pressure in multilayered completed wells using selective inflow performance (SIP) technique [C]. *SPE* 163131, 2012.
- [22] 张晓岗. 变工作制度生产测井技术在伊拉克 H 油田应用[J]. *国外测井技术*, 2018, 39(2):58-60.
- ZHANG Xiaogang. Application of variable working system production logging technology in Iraq H Oilfield [J]. *World Well Logging Technology*, 2018, 39(2):58-60.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:**王峻岭,男,1985年出生,硕士,工程师,2010年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业,现主要从事试井分析、油藏评价工作。电话:010-59286717, 13811726697;Email:wangjunling@cnlc.cn。通信地址:北京市朝阳区安立路101号名人大厦1801,邮政编码:100101。