

# 基于卡层门限的纵向均衡驱替研究

王记俊 周海燕 张弛 孙强

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

**摘要:** 由于单层厚度、储量丰度和经济条件的制约,很多油藏不满足分单砂体开发的条件,为了获得较高的产能,往往采用大段合采的开发方式,导致高含水阶段层间干扰严重。针对这一问题,引入压差、含水率及渗透率影响下的多层油藏干扰系数的计算公式,修正 Vandervlis 定向井产能公式,求得卡掉干扰层前后油井产能的变化。根据地层流动系数与干扰系数对产能的影响绘制均衡驱替图版;同时定义并绘制卡层门限曲线,指导油井的合理开关层与提液措施。提出了4种应用于矿产实际生产的定量化卡提组合模式,指导油井的合理开关层与提液,矿场实际应用效果较好,有效缓解了层间矛盾,实现产能接替,年增油达  $23 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该研究对于缓解多层合采油田的层间干扰具有参考作用。

**关键词:** 卡提结合;卡层门限;纵向并进;产能接替

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.04.010

## Research on Vertical Equilibrium Displacement Based on Layer Defining Threshold

Wang Jijun, Zhou Haiyan, Zhang Chi, Sun Qiang

Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China

**Abstract:** Due to the constraints of monolayer thickness, reserve abundance and economic conditions, many reservoirs fail to meet the requirements of sub-single sandstone block development. In order to obtain higher capacity, large section of joint development are employed, which leads to serious inter-layer interference in the high water cut stage. To solve this issue, the formula of interference coefficient of multi-layer reservoir under the influence of pressure difference, water content and permeability were introduced and the Vandervlis directional well productivity formula was amended to find out the changes of production capacity before and after defining interference layer. According to the influence of formation fluidity coefficient and interference coefficient on productivity, a balanced displacement plate was drawn; at the same time define and draw the layer defining threshold curve to guide oil well switch layer and liquid extraction measures. Four kinds of quantitative card combination mode applied to the actual production of mineral were proposed, guiding the rational switch and pumping wells. The field application of the mine is better, effectively alleviating the interlayer contradiction and realizing the succession of production

收稿日期:2017-12-12

**基金项目:** 国家科技重大专项“海上油田丛式井网整体加密及综合调整油藏工程技术示范”(2011 ZX 05057-001);“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016 ZX 05058001);国家科技重大专项“海上油田丛式井网整体加密及综合调整油藏工程应用研究”(2011 ZX 05024-002-007)

**作者简介:** 王记俊(1987-),男,山东莒县人,工程师,硕士,主要从事油气藏工程和数值模拟方面的研究工作。

capacity, with an annual oil increase of  $23 \times 10^4 \text{ m}^3$ . This research provides reference for alleviating interlayer interference at multilayer joint development oilfield.

**Keywords:** Layer defining combined with liquid extraction; Layer defining threshold; Vertical advance; Succession of capacity

## 0 前言

BZ 油田是渤海地区典型的窄河道型砂岩油田,油藏纵向叠置复杂、非均质性强、井网不规则,目前已进入中高含水期,注入水单层突破严重,导致油井受效不均,层间干扰严重,油田水驱开发效果差。产液结构调整是克服层间干扰并实现纵向均衡开采的重要方法,目前,国内外学者也提出了组合提液的方法,但都是定性描述,缺乏系统的研究和定量化的标准<sup>[1-2]</sup>。为了提高油井开关层与提液措施的成功率,通过修正干扰系数计算公式,根据卡层前后油井产能的变化,定义卡层门限,量化研究合理开关层与提液模式,实现纵向均衡驱替。

## 1 层间动态干扰系数

为了直观地描述不同开发阶段层间干扰对合采效果的影响,引入干扰系数的概念。干扰系数的物理意义是多层油藏注水合采时,层间干扰导致多层合采油井整体产能相对分层开采降低的程度。

$$CF = \left[ \sum_{i=1}^n J_{\text{doi}} - \sum_{i=1}^n J_{\text{hoi}} \right] / \sum_{i=1}^n J_{\text{doi}} \quad (1)$$

式中:CF 为层间干扰系数,无因次; $J_{\text{hoi}}$  为合采时采油指数,  $\text{m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa})$ ;  $J_{\text{doi}}$  为分采时采油指数,  $\text{m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa})$ ;  $i$  为小层序号;  $n$  为合采总层数,层。

目前,层间干扰的主要研究方法有油井分层产能测试法及统计回归方法。根据黄世军、岳陆等人<sup>[3-4]</sup>的物理实验结果,对渗透率级差、基准渗透率、渗透率偏差系数等变量对干扰系数的影响规律进行相关性分析,可以计算层间干扰系数。

$$CF = \frac{\lambda \left( \alpha + \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} f_w^i \right) \left( \ln \frac{K_{\text{max}}}{K_{\text{min}}} \right)^\omega}{\ln (1 + K_{\text{min}})^\gamma \left( \frac{K_{\text{ave}} - K_{\text{min}}}{K_{\text{max}} - K_{\text{min}}} \right)^\tau} \quad (2)$$

式中: $K_{\text{max}}$  为高渗层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{\text{ave}}$  为储层平均渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{\text{min}}$  为低渗层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $f_w$  为含水率, %;  $\lambda$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\omega$ 、 $\tau$  为无因次参数项。

式(2)表征不同含水阶段,由储集层整体非均质性及纵向各小层驱替能量差异引起的相互干扰<sup>[3-5]</sup>。

## 2 考虑层间干扰的定向井产能

为了明确层间干扰对定向井产能的影响,对 Vandervlis

定向井产能公式进行修正,考虑层间干扰的定向井产能公式为<sup>[6-8]</sup>:

$$q = \frac{542.87(1 - CF) \sum_{i=1}^n \frac{k_i h_i \Delta p_i}{\mu_{oi} B_{oi}}}{\ln \frac{R_{ev}}{r_{we}} + S} \quad (3)$$

式中: $q$  为油井产能,  $\text{m}^3 / \text{d}$ ;  $k_i$  为第  $i$  小层的储层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $h_i$  为第  $i$  小层的有效厚度,  $\text{m}$ ;  $B_{oi}$  为第  $i$  小层的原油体积系数;  $\mu_{oi}$  为第  $i$  小层的原油黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\Delta p_i$  为第  $i$  小层的生产压差,  $\text{MPa}$ ;  $R_{ev}$  为供给半径,  $\text{m}$ ;  $r_{we}$  为有效井筒半径,  $\text{m}$ ;  $S$  为表皮系数。

根据考虑层间干扰的定向井产能公式可以定量评价层间干扰对产能的影响程度,而油井在实际生产过程中,往往采用开关层作业卡掉干扰较严重的层,缓解层间矛盾,以获得较高的产能<sup>[9-11]</sup>。但是到底什么样的层该卡,什么样的层该留,尚无一个定量化的衡量标准。

## 3 卡层门限的确定

为了定量评价各层对油井产能的贡献程度,定义卡层前后的产能变化<sup>[12-13]</sup>:

$$\Delta q = \frac{(1 - CF_{n-\eta}) \sum_{i=1}^{i=n-\eta} \frac{k_i h_i \Delta p_i}{\mu_{oi}}}{(1 - CF_n) \sum_{i=1}^n \frac{k_i h_i \Delta p_i}{\mu_{oi}}} = \Delta CF \Delta M \Delta E \quad (4)$$

式中: $\Delta q$  为卡层前后产能变化,  $\text{m}^3 / \text{d}$ ;  $CF_n$  为  $n$  层合采干扰系数;  $CF_{n-\eta}$  为  $n - \eta$  层合采干扰系数;  $\Delta CF$  为卡层前后干扰系数的变化;  $\Delta M$  为卡层前后各层流动系数累积的变化,  $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m} / \text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\Delta E$  为卡层前后各层生产压差累积的变化,  $\text{MPa}$ ;  $\eta$  为小层数,层。

根据卡层前后油井的产能变化,得到不同干扰系数变化影响下的均衡驱替图版,见图1。

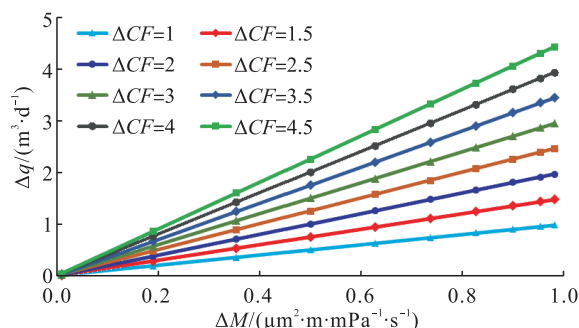


图1 不同干扰系数变化影响下的均衡驱替图版

由图1表明,在卡层前后干扰系数变化一定的情况下,随着卡层前后各层流动系数累积值变化的增加,卡层后油井的产能逐渐增大,也就是卡层的储层物性越差或者卡掉的层数越少,卡层后油井产能越大;当卡层前后各层流动系数累积值变化一定的情况下,随着卡层前后干扰系数变化的增大,卡层后油井的产能逐渐增加,也就是卡层的干扰越强,卡掉该层后油井的产能越高。

当 $\Delta CF\Delta M\Delta E > 1$ 时,则 $\Delta q > 1$ ,说明卡层后油井的产量会增加,即卡层后由于生产厚度减小损失的产能小于干扰系数降低增大的产能,卡掉强干扰层后,油井的产量上升。对于注采较完善的井网,一般各层生产压差变化不大,将 $\Delta CF$ 定义为干扰界限, $\Delta N = 1 - \Delta M$ 定义为卡层门限,得到一条卡层门限的对数曲线,见图2。

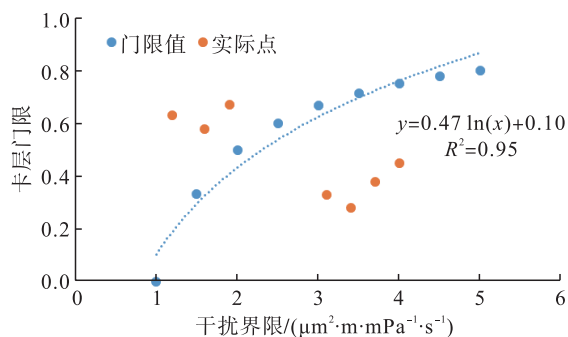


图2 卡层门限对数曲线

由图2可知,随着干扰界限的增大,卡层门限值也逐渐增加,也就是层间干扰越强时,可以允许卡层的流动系数累积值越大。在实际生产过程中,位于对数曲线右下方的井点在卡层后产能会增加,卡层门限曲线是指导合理开关层的重要界限。

#### 4 合理开关层与提液模式

以纵向均衡驱替为目标,提出了先卡层后提液、先提液后卡层、笼统提液及单层开采这4种卡提组合模式。

当 $\Delta CF\Delta M > 2$ 时,采用先卡层后提液的模式。此时层间干扰对整体产油效果的抑制作用明显加剧,纵向各层的含水率差异逐渐变大,继续提液会进一步加剧这种差异,层间干扰更加严重;而卡掉强干扰层后,油井产能增幅较大,同时可防止层间干扰进一步加剧;然后再进行提液,实现纵向各层均匀推进,扩大波及体积。

当 $1 \leq \Delta CF\Delta M \leq 2$ 时,采用先提液后卡层的模式。此时由于纵向各层物性差异引起的层间干扰较小,由干扰引起的纵向各层的含水率差异也不大,卡掉干扰层后产能会有一定增加,但是增幅不大,该开发阶段的主要目的仍是提高采油速度,所以采用先提液增加产能,待层间干扰进一步加剧时再卡掉强干扰层。

当 $\Delta CF\Delta M < 1$ 时,纵向各层的储层物性相差不大,

由于储层物性差异引起的层间干扰较小,油井生产到中高含水阶段纵向各层的含水率差异也不大,渗流阻力差异引起的干扰也较小,可以笼统提液,提高产能。

当 $\Delta CF\Delta M > 1$ ,且卡层具有单层开采的物质基础时,可以根据井网完善程度考虑分层系开发<sup>[14-17]</sup>。

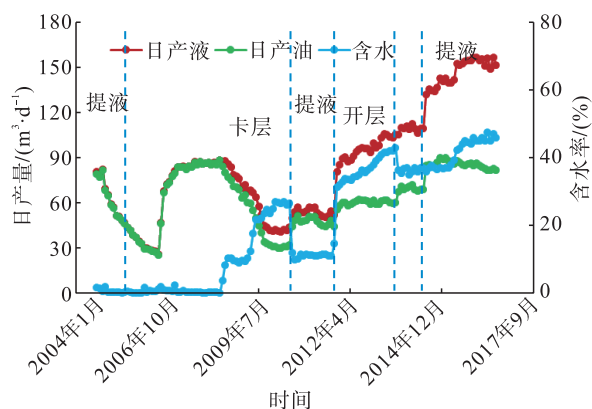


图3 A01井生产动态曲线

以BZ油田A01井为例,A01井生产动态曲线见图3。该井2004年11月投产,2006年7月实施提液措施后,日产油量由 $25 \text{ m}^3$ 上升到 $85 \text{ m}^3$ ,含水率保持不变,动态干扰系数基本不变;2010年4月实施卡层措施后,生产厚度由 $33.5 \text{ m}$ 下降到 $23.7 \text{ m}$ ,渗透率极差由11下降到5,动态干扰系数由0.55下降到0.42,含水率由29%下降到11%,平均日产油量由 $26 \text{ m}^3$ 上升到了 $49 \text{ m}^3$ ,卡层后干扰系数和含水率均有降低;2011年9月实施提液措施后,日产油量由 $45 \text{ m}^3$ 上升到 $60 \text{ m}^3$ ,含水率逐渐升高;2013年6月实施开层措施后,含水率由43%下降到36%,平均日产油量由 $60 \text{ m}^3$ 上升到 $70 \text{ m}^3$ ,开层后有效动用了低含水层;2014年3月再次实施提液措施后,平均日产油量由 $65 \text{ m}^3$ 上升到 $88 \text{ m}^3$ 。

通过该方法指导BZ油田实施开关层与提液措施46井次,日增油 $450 \text{ m}^3$ ,年增油 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,结合地质油藏特征及井网完善程度,指导6口调整井分单砂体开发,日增油 $300 \text{ m}^3$ ,年增油 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

#### 5 结论与认识

引入含水率与压差的影响改进干扰系数计算公式,根据考虑干扰系数的定向井产能公式,绘制卡层前后流动系数累积变化值与产能变化的关系图版,推导卡层门限值,并求得卡层门限曲线及计算公式,指导合理开关层,实现产能接替。

应用卡层门限和干扰界限为定量约束,提出了先卡层后提液、先提液后卡层、笼统提液及单层开采4种卡提组合的合理开关层和提液模式,指导实施油井开关层与提液措施46井次,分层部署调整井6口,日增油 $750 \text{ m}^3$ ,年增油 $23 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

## 参考文献:

- [1] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 1-4.  
Zhou Shouwei. The Study and Application of New Mode of Effective Development of Offshore Heavy Oil Field [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29 (5): 1-4.
- [2] 苏彦春, 贾晓飞, 李云鹏, 等. 多层合采油藏层间动态干扰定量表征新技术[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 101-103.  
Su Yanchun, Jia Xiaofei, Li Yunpeng, et al. New Technology for Quantitative Characterization of Interlayer Dynamic Interference in Commingled Producing Oil Reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22 (6): 101-103.
- [3] 黄世军, 康博韬, 程林松, 等. 海上普通稠油油藏分层系合采层间干扰定量表征与定向井产能预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 488-495.  
Huang Shijun, Kang Botao, Cheng Linsong, et al. Quantitative Characterization of Interlayer Interference and Productivity Prediction of Directional Wells in the Multilayer Commingled Production of Ordinary Offshore Heavy Oil Reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (4): 488-495.
- [4] 岳 陆, 张还恩. 多层水驱油室内模拟试验研究[J]. 断块油气田, 1994, 1(3): 33-38.  
Yue Lu, Zhang Huai'en. Laboratory Simulating the Waterflooding Recovery for the Multi-Layer Reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1 (3): 33-38.
- [5] Cinco-Ley H, Ramey H J Jr, Miller F G. Pseudo-skin Factors for Partially Penetrating Directionally Drilled Wells [C]// Paper SPE 5589-MS was Presented at the Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 28 September-1 October, 1975, Dallas, Texas, USA. New York: SPE, 1975.
- [6] 王春生, 曹海宇. 稠油油藏直平井组合立体开发实验研究[J]. 天然气与石油, 2017, 35(4): 25-27.  
Wang Chunsheng, Cao Haiyu. Experimental Study on Stereoscopic Development with the Combination of Vertical and Horizontal Wells in Heavy Oil Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (4): 25-27.
- [7] Besson J. Performance of Slanted and Horizontal Wells on an Anisotropic Medium [C]// Paper SPE 20965-MS was Presented at the European Petroleum Conference, 21-24 October, 1990, The Hague, Netherlands. New York: SPE, 1990.
- [8] 张俊法, 汤达祯, 赵梅叶. 一种计算单井动储量的新方法[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 96-101.  
Zhang Junfa, Tang Dazhen, Zhao Meiyue. A New Method for Determining Dynamic Reserves in a Single Well [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31 (1): 96-101.
- [9] Palacio J C, Blasingame T A. Decline Curve Analysis Using Type Curves Analysis of Gas Well Production Data [C]// Paper SPE 25909 was Presented at the Low Permeability Reservoirs Symposium, 26-28 April, 1993, Denver, Colorado, USA. New York: SPE, 1993.
- [10] 李 波, 罗宪波, 刘 英, 等. 判断层间非均质性的新方法[J]. 中国海上油气, 2007, 19(2): 93-95.  
Li Bo, Luo Xianbo, Liu Ying, et al. A New Method to Judge Interlayer Heterogeneity [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19 (2): 93-95.
- [11] 郑 舰. 王庄油田特超稠油油藏渗流机理与开发技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.  
Zheng Jian. Study on Seepage Mechanism and Development of Technology for Super Heavy Oil in Wangzhuang Oilfield [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [12] 韩大匡, 万仁溥. 多层砂岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 132-145.  
Han Dakuang, Wan Renpu. The Development Models of Multizone Sandstone Reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 132-145.
- [13] 任芳祥, 孙洪军, 户昶昊. 辽河油田稠油开发技术与实践[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 1-8.  
Ren Fangxiang, Sun Hongjun, Hu Changhao. Heavy Oil Development Technology and Practices in Liaohe Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19 (1): 1-8.
- [14] Athichanagom S, Horne R N, Kikani J. Processing and Interpretation of Long-term Data from Permanent Downhole Pressure Gauges [C]// Paper SPE 56419-MS was Presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October, 1999, Houston, Texas, USA. New York: SPE, 1999.
- [15] 刘洪杰. 常规油藏多层合采层间干扰系数确定新方法[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(5): 80-82.  
Liu Hongjie. New Determination Method of Interlayer Interference Coefficient among Commingling Production Layers in Conventional Reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27 (5): 80-82.
- [16] 陈元千. 油田高含水期预测采收率的方法[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(3): 247-252.  
Chen Yuanqian. A Method of Prediction of Recovery Factors in Oilfields at High-water-cut Stage [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15 (3): 247-252.
- [17] 于会利, 汪卫国, 荣 娜, 等. 胜坨油田不同含水期层间干扰规律[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 71-73.  
Yu Huili, Wang Weiguo, Rong Na, et al. Rule of Interlayer Interference in Various Water Cut Periods of Shengtuo Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13 (4): 71-73.