

# 一种微粒运移影响油井产液规律的数模表征方法

赵靖康, 安玉华, 李媛婷, 王 刚, 刘建华

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452)

**摘要:** P油田为多层砂岩油藏, 采用防砂完井方式生产, 目前进入中高含水期, 油井产液规律与常规油田开发不同, 多数油井投产后产液下降, 少数油井投产后产液量稳定或随着含水升高而增加, 对油藏数值模拟拟合与开发指标预测有很大影响。通过对油田100多口油井的产液规律分析, 认为井筒附近可移动微粒含量是影响产液规律的主要因素。为了在数模中表征这种现象, 通过对油井月平均产液指数标准化和累积产液标准化, 结合油井射孔段不同的可移动微粒平均含量, 进行大数据统计分析, 回归建立无因次产液指数变化倍数、累积产液和可移动微粒含量的关系公式。新方法应用于油藏数值模拟的历史拟合和预测, 大幅改善了拟合和预测精度。

**关键词:** 井筒堵塞; 数值模拟; 可动微粒含量; 采液指数

中图分类号: TE319

文献标志码: A

## A numerical simulation method of particle migration affecting well fluid production

ZHAO Jingkang, AN Yuhua, LI Yuanting, WANG Gang, LIU Jianhua

(Bohai Oil Research Institute of CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The P Oilfield is a multi-layer sandstone reservoir, which is produced by the sand control completion method, and is now entering the medium to high water cut period. The liquid production law of oil wells is different from conventional oilfield development, with most wells producing decreasing fluid after production, and a few wells producing stable fluid or increasing with increasing water cut after production, which has a great impact on the numerical simulation fitting and development index prediction of the reservoir. Based on the analysis of the liquid production law of more than 100 oil wells in the oilfield, it is concluded that the content of movable particles near the wellbore is the main factor affecting the liquid production pattern. To characterize this phenomenon in the numerical model, a large data statistical analysis was performed by normalizing the monthly average fluid production index and cumulative fluid production of the wells, combining different average contents of movable particles in the perforation section of the wells, and regressing to establish the relationship formulas of non-dimensional liquid production index decline times, cumulative liquid production and the movable particle content. The new method was applied to the historical fitting and prediction of reservoir numerical simulation, which greatly improves the fitting and prediction accuracy.

**Key words:** wellbore blockage; numerical simulation; movable particle content; liquid production index

**引用格式:** 赵靖康, 安玉华, 李媛婷, 等. 一种微粒运移影响油井产液规律的数模表征方法[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 191–194.

ZHAO Jingkang, AN Yuhua, LI Yuanting, et al. A numerical simulation method of particle migration affecting well fluid production [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 191–194.

## 1 油藏地质概况

P油田主力含油层发育于新近系明化镇组下段和馆陶组, 含油层段地层厚度100~600 m, 单井钻遇油层厚度30~160 m, 砂泥岩互层。主要含油目的层划分为13个油组, 其中明化镇组下段发育5个油组, 馆陶组8个油组。储层均具有中高孔、高渗的特征, 孔隙度21%~35%, 渗透率 $(50 \sim 2\,500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。地下原油黏度变化较大, 分布范围为9.1~142.0 mPa·s。

油田目前主要开发馆陶组, 生产井防砂完井, 采用350 m井距反九点注采井网, 平均生产井段长度约380 m。2003年1月开始投产, 2003年9月开始注水。历经十多年注水开发, 油田进入中高含水期, 油井产液规律与常规油田开发不同, 60%以上油井投产后产液、流压下降, 约30%油井投产后产

收稿日期: 2022-08-10; 改回日期: 2022-10-09。

第一作者简介: 赵靖康(1973—), 高级工程师, 目前从事油气田开发研究工作。E-mail: zjk4846679@163.com。

液量稳定、流压下降,不足10%的油井随着含水升高产液量增加,对油藏数值模拟的拟合与开发指标预测有很大影响(见图1)。

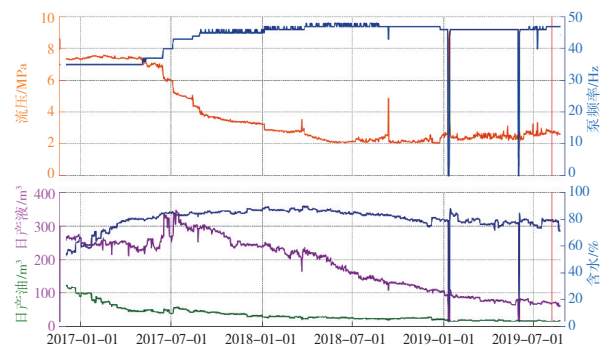


图1 油田典型井生产曲线

本文通过油田100多口油井的产液规律分析,认为井筒附近可移动微粒含量是影响产液规律的主要因素,为了在数模中表征这种现象,对油井生产层段可动微粒含量与油井产液规律进行大数据分析统计,回归建立无因次产液指数变化倍数、累积产液和可移动微粒含量的关系公式,能够较好地描述微粒运移造成的井筒附近堵塞,表征油井产液递减规律,改善数模拟合和预测效果<sup>[1-7]</sup>。

2 油井微粒运移堵塞规律表征

2.1 油井产液规律分析

对油田120口正常生产无措施油井按生产时间对齐求取平均日产液和平均生产压差,计算采液指数与累产液并作图(见图2),发现采液指数初期下降快,后期变化不大,二者具有平面径向流特征的

对数递减关系,且相关性较高,系数为0.843 8。

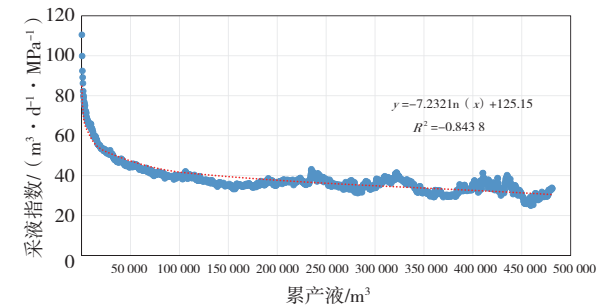


图2 油田单井平均采液指数与累产液关系

将油田不同单井累产液与采液指数做在一张图上并回归其相关性(见图3),发现二者都具有对数关系且相关系数在0.8以上,与油田总体认识规律一致,但单井回归关系式的常数项差异较大,与井周围物性、流体性质、可动微粒含量、生产压差等因素有关(见表1),分析认为在相同生产条件下,储层可动微粒含量越高、物性越差,即使小压差生产也易形成微粒运移堵塞,其常数项越大。

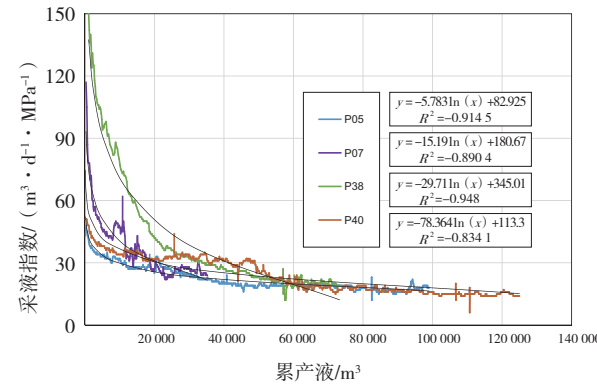


图3 P油田单井累产液与采液指数对比

表1 油田单井生产参数统计

井号	生产厚度/ m	生产层平均渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	生产层平均泥质含量/ %	地面原油密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	初期生产压差/ MPa
P05	70.0	962	11.08	0.975 2	4.03
P07	65.3	854	13.12	0.969 7	2.68
P38	49.0	600	17.83	0.976 9	2.83
P40	72.2	1 437	10.71	0.983 8	4.62

2.2 微粒运移井筒附近堵塞原因分析

油田评价井粒度分析表明,纵向上各层储层粉砂岩和泥质含量较高且差异较大(见图4),而本油田油井均采用防砂完井方式生产,防砂陶粒粒径为0.060~0.118 mm,当井筒附近储层中可动微粒运移到防砂管外窄小喉道处,不能流入井筒随液体产出时,导致近井地带堵塞,渗透性降低造成该层段产

液量下降(见图5)。大量研究<sup>[8-10]</sup>表明井筒附近可动微粒运移产生条件与可动微粒大小和含量、瞬时生产压差、瞬时流速等因素相关,而造成堵塞是个累积效应的复杂过程,在数模拟合过程中难以表征,常通过不断修改表皮或PI指数方法替代描述微粒运移造成堵塞的累积过程,工作量大且精度较差。本文提出利用累产液与可动微粒含量、无因次

产液指数变化倍数的数学关系式来表征油井井筒附近微粒运移堵塞过程,很好地解决了这个问题<sup>[11-19]</sup>。

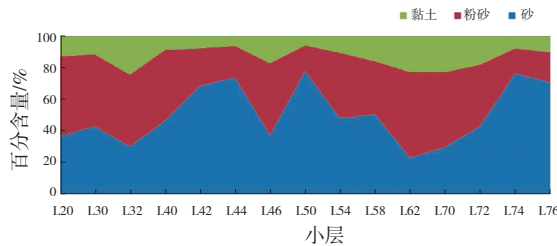


图4 小层碎屑颗粒粒度三级分类对比

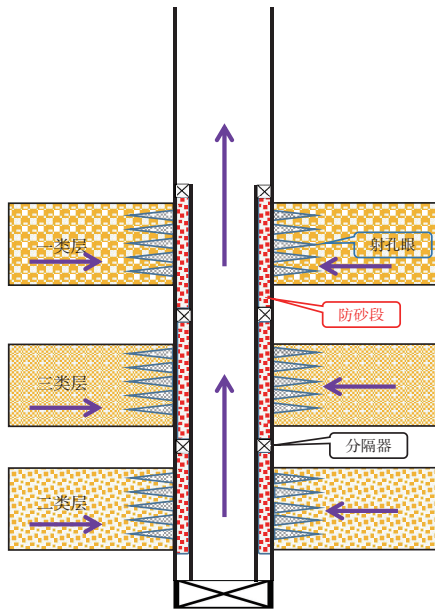


图5 P油田油井微粒运移堵塞示意

### 2.3 建立标准化累产液与无因次米采液指数关系

在油藏数值模拟历史拟合中我们常常以月为基础,使用月度平均生产数据,同时单井累产液与采液指数回归关系的常数项受多种因素影响,无法用一个公式应用到油藏数值模拟中。为了消除储层物性、厚度、流体性质对累产液和采液指数关系影响,以及数模中使用月度平均生产数据与日常数据的转化,将回归公式关系能够应用到油藏数值模拟中描述近井筒微粒运移堵塞过程,提出对油井累产液进行标准化和采液指数进行无因次处理。首先将油井月平均日产液除以生产厚度,乘以月生产天数,重新计算得到油井米累产液即标准化累产液;其次将井生产过程中实际采液指数按月平均,并除以初期最大采液指数,得到无因次采液指数倍数,建立标准化累产液与无因次采液指数变化的倍数关系(见图6)。二者具有指数关系,与累产液与采液指数的对数关系不同,该关系式消除了不同井

的储层物性、厚度、流体性质等因素影响,常数项仅与井筒附近可动微粒含量有关。

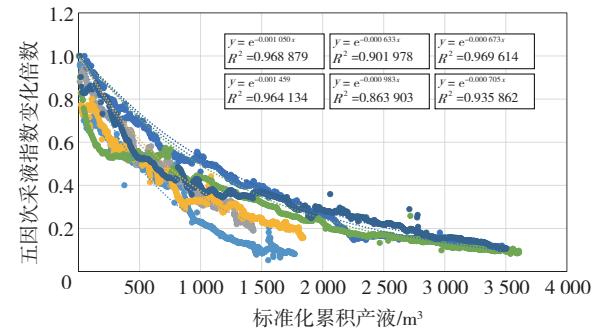


图6 油井标准化累产液与无因次采液指数倍数关系

### 2.4 可动微粒含量与二者关系式相关性研究

标准化累产液与无因次采液指数倍数具有指数关系: $Y = e^{(aX)}$ ,其相关系数较高,但其中的常数项 $a$ 仍然有差异,分析认为是可动微粒含量造成,但无法直接获得可动微粒含量,从现场打捞出防砂管来看主要为泥质和粉砂岩,而油井生产层段各层粉砂岩和泥质含量差异大,对各层生产也影响不同,因此利用渗透率与厚度乘积加权计算单井平均粉砂岩和泥质含量值之和 $vs_{lit}$ ,并与常数项 $a$ 作图(见图7),二者线性相关性较好,关系式为:

$$a = -0.0087vs_{lit} + 0.0004 \quad (1)$$

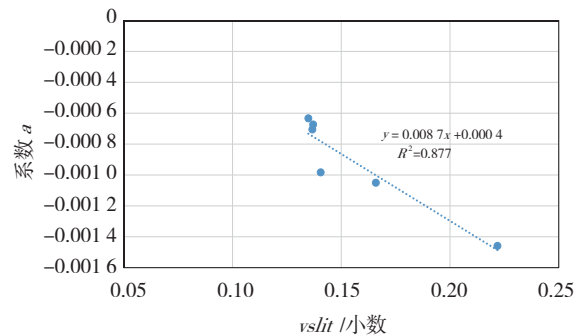


图7 油井 $vs_{lit}$ 含量与系数 $a$ 关系

### 2.5 油井微粒运移堵塞模板建立

由上述回归得到系数 $a$ 导入标准化累产液与无因次采液指数倍数关系式,得出油田生产井不同可动微粒含量因微粒运移造成井筒附近堵塞表达式:

$$J = \exp [(-0.0087vs_{lit} + 0.0004)Q] \quad (2)$$

式中, $vs_{lit}$ 为小层粉砂岩和泥质含量之和,小数; $Q$ 为小层累产液量, $m^3$ 。利用上述公式建立不同可动微粒含量下米累产液与采液指数变化倍数关系图版(见图8)。从图版可以看出可动微粒含量小于5%时,采液指数变化不大,因此公式也能描述正常生产井的产液规律。



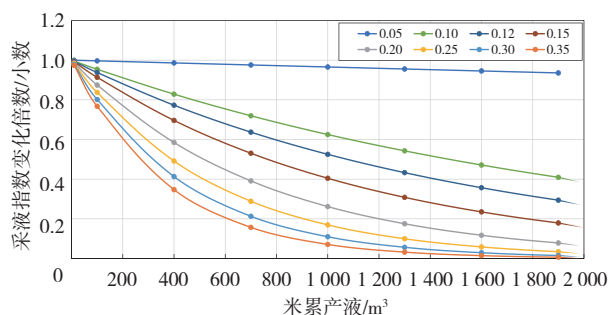


图8 油井产液规律模板

### 3 应用效果

与常规油藏数值模拟不同,增加粉砂岩和泥质含量属性场,在模型运算过程中自动读取油井射孔网格粉砂岩、泥质含量,通过编制程序将建立标准化累产液与无因次采液指数变化倍数关系引入数模拟合过程,修改射孔网格采液指数PI倍数,实现微粒运移井筒附近堵塞规律的表征,对P油田油藏数值模拟生产井历史拟合,与常规老方法对比,新方法流压拟合效果更好(见图9)。

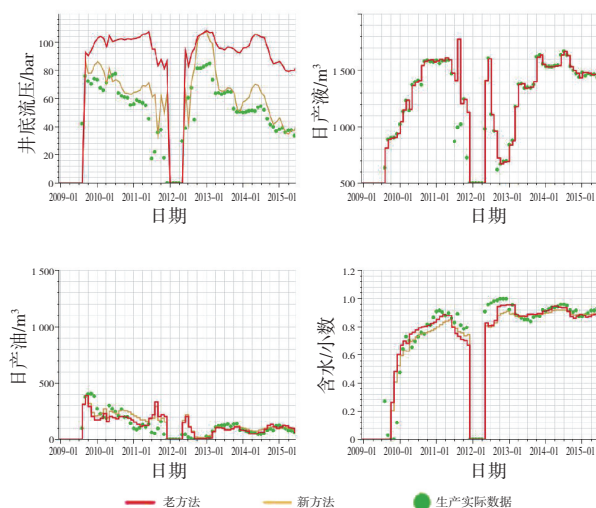


图9 P油田常规拟合与新技术拟合对比

### 4 结论

(1) P油田油井无因次采液指数具有初期下降快,后期变化不大的特点,说明微粒运移在井筒附近的堵塞主要发生在投产的初期阶段。

(2) 油井产生微粒运移堵塞的主要原因是防砂完井阻遏储层中可动微粒运移到防砂管外窄小喉道处,不能流入井筒产出,降低了近井地带渗透性。

(3) 本文回归的公式受本油田储层条件、可动微粒含量、防砂管目数、油井生产条件等因素限制,可能仅适合本油田,但研究方法具有普遍推广意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘超,冉兆航,刘彦成,等.基于储层微观特征的疏松砂岩增产实践[J].新疆石油天然气,2019,15(1):52-57.
- [2] 张绍槐,蒲春生,李琪.储层伤害的机理研究[J].石油学报1994,15(4):58-64.
- [3] 陈世明.雁木西疏松砂岩油藏水驱油渗流特征研究[J].石油地质与工程,2011,25(2):82-84.
- [4] 刘宇,张迎春,李红英,等.产液、吸水指数预测方法及其在SZ361油田的应用[J].特种油气藏,2008,15(1):63-64.
- [5] 赵靖康,刘建华,姜立富,等.P油田油井产液规律影响因素分析[J].复杂油气藏,2021,14(2):63-67.
- [6] 刘超,王刚,韩建斌,等.渤海湾疏松砂岩储层微观特征及开发实践[J].石油化工高等学校学报,2021,34(6):35-41.
- [7] 马帅,黄静,张风波,等.南海西部低渗疏松砂岩油藏水平井合理生产压差研究[J].特种油气藏,2018,25(2):138-142.
- [8] 谢一婷.疏松砂岩油藏适度出砂近井地层渗透率变化规律研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [9] 石京平,宫文超,曹维政,等.储层岩石速敏损害机理研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(5):501-504.
- [10] 李萍,邓金根,王利华,等.疏松砂岩出砂临界流量实验研究[J].断块油气田,2010,17(6):748-750.
- [11] 陈金辉,康毅力,游利军,等.储层岩石破裂诱发微粒运移损害实验研究[J].钻井液与完井液,2010,27(3):17-22.
- [12] 苏崇华.疏松砂岩油田生产过程中储层伤害机理研究[J].中国海上油气,2009,21(1):31-34.
- [13] 孟海洋.油田完井方式工艺技术研究[J].化工设计通讯,2021,47(12):28-29.
- [14] 蔡忠.储集层孔隙结构与驱油效率关系研究[J].石油勘探与开发,2000,27(6):45-46,49.
- [15] 李存贵,徐守余.长期注水开发油藏的孔隙结构变化规律[J].石油勘探与开发,2003,30(2):94-96.
- [16] 焦创舞,付伟,赵俊兴,等.白豹油田长4+5成岩作用与储层分类评价[J].成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(5):522-527.
- [17] 陈杰,周改英,赵喜亮,等.储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J].特种油气藏,2005,12(4):11-14.
- [18] 罗蛰潭,王允诚.油气储集层的孔隙结构[M].北京:科学出版社,1986:21-43.
- [19] 金毓荪,巢华青,赵世远,等.采油地质工程[M](第2版).北京:石油工业出版社,2003:75-83.

(编辑 谢 葵)