

引用格式:彭凯,王昊,齐京国.基于连续液面曲线的间歇采油工作制度优化研究[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):254-259.

PENG Kai, WANG Hao, QI Jingguo. Optimization of interval production working system based on continuous liquid level curve[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 254-259.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.015

## 基于连续液面曲线的间歇采油工作制度优化研究

彭凯,王昊,齐京国

(中国石油冀东油田公司南堡油田作业区,河北唐山063200)

**摘要:** 间歇采油是低产低效井挖潜的常用方式,在应用中大部分都是通过定性和效益因素确定工作制度,缺乏科学性。为精细化、量化优化其工作制度,结合物质平衡、流入流出动态等理论,并综合考虑井斜、储层物性参数等因素,建立了间歇采油的开关井液面耦合数学模型,并创新性地模型计算结果与实测液面恢复曲线进行拟合,从而求得地层物性参数。在此基础上,通过枚举法将开关井液面进行等分,并从井口产量、泵效、地层流入量等多方面进行优化评价,最终确定合理的工作制度。通过矿场应用验证表明:建立的耦合数学模型,将其数值迭代结果与实测液面恢复曲线进行拟合,能更科学确定间歇采油工作制度,确保油井处于高效协同供排关系。

**关键词:** 耦合数学模型;泵效;间歇采油;工作制度;液面恢复曲线

中图分类号:TE355

文献标识码:A

### Optimization of interval production working system based on continuous liquid level curve

PENG Kai, WANG Hao, QI Jingguo

(Nanpu Oilfield Operation Area of PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

**Abstract:** For low production and low efficiency wells, interval production is usually used to tap potential. However, most practices are based on qualitative and benefit factors to determine interval production parameters, which are lack of scientific accuracy. In order to optimize and study the interval production parameters more precisely and quantitatively, combining the theoretical basis of material balance, inflow and outflow dynamics and other parameters such as well deviation and reservoir physical properties are taken into account, the mathematical model of fluid level coupling in the switch well for interval oil production is established. The coupling model calculation results are innovatively matched with the measured dynamic level recovery curve to obtain the reservoir physical parameters. On the basis of the above, the dynamic liquid level during shut in and pumping is divided into equal parts by enumeration method, the reasonable working parameters are determined by optimizing and evaluating the wellhead production, pump efficiency and formation inflow. The field application verification shows that: fitting the numerical iteration results of the coupled mathematical model with the measured liquid level recovery curve, it can more scientifically determine the interval production parameters. At the same time, it also ensures that the oil wells are in an efficient and coordinated supply and discharge relationship.

**Keywords:** coupled mathematical models; pump efficiency; interval production; working system; dynamic liquid level recovery curve

各大油田针对低产低效井的效益挖潜,主要还是采用间歇采油的方式,为确定最优工作制度,很多

学者从经济极限、数理统计分析等方面做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>。熊友明<sup>[6]</sup>在理论研究基础上建立了间歇采

收稿日期:2022-10-27。

第一作者简介:彭凯(1988—),男,硕士,工程师,主要从事提高采收率、堵水调剖等工作。地址:河北省唐山市唐海镇汇丰路47号南堡作业区,邮政编码:063200。E-mail:704038058@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“南堡凹陷油气富集规律与增储领域”(2016ZX05006-006)。

油过程中动液面与开井时间的数学模型,定性优化出最佳开关井时机;李松岑<sup>[7]</sup>通过研究泵效与沉没度的关系,获得计算最小沉没度的方法,并通过经济极限约束间歇采油方式,最终优选合理动液面区间;蒙晓灵等<sup>[8]</sup>从地层供液能力出发,对间开制度进行定量优化;李婧<sup>[9]</sup>通过计算间开损液量,在此基础上确定合理动液面区间,进而优选最佳工作制度;周代余等<sup>[10]</sup>从盈亏平衡理论入手,通过极限经济效益评价确定间抽生产制度;张丰峰等<sup>[11]</sup>根据液面、泵效、沉没度、液面恢复速度等多因素,从统计学角度确定间歇生产制度。

通过研究发现,通过定性分析或者考虑经济界限因素对低产低效井工作制度进行优化<sup>[12]</sup>,计算结果并未与实测液面恢复曲线进行验证,与生产实际吻合度不高。为此,从物质平衡、地层流入流出等理论出发,综合考虑井斜、储层物性、泵况等因素,建立间歇采油动液面耦合数学模型,并将计算结果与实测液面恢复曲线进行拟合,获取储层地层参数,并在此基础上,通过枚举法对间歇采油工作制度进行优选,能更科学确定间歇采油工作制度,确保油井处于高效协同供排关系。

## 1 间歇采油耦合数学模型理论

大斜度井间歇采油动液面变化如图1所示,间歇采油关井液面恢复阶段,抽油泵停止工作,地层流体

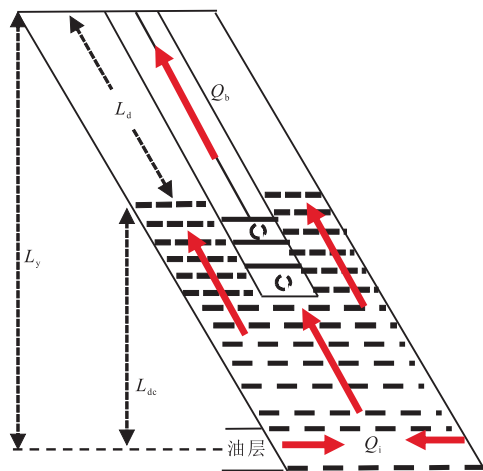


图1 大斜度井井筒示意图

Fig. 1 Diagram of wellhole of high angle hole

克服井筒内液柱压力流入井筒,直至液面恢复至静液面。受井斜影响,大斜度井液面恢复速度高于直井液面恢复速度。同理,开井生产时抽油泵开始工作,当抽油泵排出量大于地层流入量时,动液面随之下降,地层流入瞬时流量也随之增加。若泵排出量持续大于地层供给量,则动液面下降至泵口,直至泵排出量为零。与连续生产不同的是,间歇采油的动液面、泵排出量、地层流入量、泵效等参数都是相互关联、耦合的。为确定大斜度井间歇采油合理工作制度,需要建立多参数耦合数学模型。基于物质平衡、流入流出动态理论,首先建立关井阶段大斜度井动液面恢复数学模型,通过数值迭代对动液面进行求解,并与实测液面恢复曲线进行拟合,获取地层参数。在此基础上,建立开井阶段动液面与泵效、井斜等因素的耦合数学模型,利用枚举法将静液面与泵深进行等分,设置不同组合方案,合理优化间歇采油工作制度。耦合数学模型考虑了以下条件:①忽略摩擦阻力;②宏观渗流规律遵循VOGEL方程<sup>[13]</sup>;③井身结构为大斜度;④考虑流体为油水两相。

### 1.1 关井恢复动液面数学模型

关井液面恢复时,井筒内动液面斜深为 $L_d$ ,地层瞬时流入量为 $Q_i$ ,此时抽油泵不工作,因此, $Q_b$ 为0。在一个时间步长 $\Delta t$ 内,两者流量之差为动液面变化,可用表达式表示:

$$\Delta L_d = \frac{(Q_i - Q_b)\Delta t}{A_1} \quad (1)$$

式中: $\Delta L_d$ 为动液面斜深变化,m; $Q_i$ 为地层瞬时流入量, $m^3/d$ ; $Q_b$ 为泵瞬时排出量, $m^3/d$ ; $\Delta t$ 为时间步长,d; $A_1$ 为套管横截面积, $m^2$ 。

其中地层瞬时流入量 $Q_i$ 遵循VOGEL方程,其表达式为:

$$Q_i = Q_{\max} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_i} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: $Q_{\max}$ 为地层最大无阻流量, $m^3/d$ ; $p_{wf}$ 为井底流动压力,MPa; $p_i$ 为静液柱压力,MPa。

其中, $P_{wf}$ 和 $P_i$ 可以用如下方程式进行简化:

$$P_{wf} = \rho g (L_y - L_{dc}) \quad (3)$$

$$P_i = \rho g (L_y - L_i) \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为井筒内混合液密度, $kg/m^3$ ; $L_y$ 为动液面与油

层中部的垂深差,  $m$ ;  $L_{dc}$  为动液面垂深,  $m$ ;  $L_i$  为静液面与油层中部的垂深差,  $m$ 。

可以将式(2)、式(3)、式(4)代入式(1)中即可获得关井恢复时动液面数学模型:

$$A_i \frac{\Delta L_d}{\Delta t} = Q_{\max} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{L_y - L_{dc}}{L_y - L_i} \right) - 0.8 \left( \frac{L_y - L_{dc}}{L_y - L_i} \right)^2 \right] \quad (5)$$

### 1.2 开井生产动液面数学模型

当液面恢复至开井条件时,抽油泵开始工作,地层瞬时流入量与抽油泵瞬时排出量不匹配,导致动液面下降,其数学模型如下:

$$(A_i - A_p) \frac{\Delta L_d}{\Delta t} = Q_{\max} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{L_y - L_{dc}}{L_y - L_i} \right) - 0.8 \left( \frac{L_y - L_{dc}}{L_y - L_i} \right)^2 \right] - Q_b \quad (6)$$

其中,  $Q_b$  的表达式为:

$$Q_b = 1440SNA_p \eta \quad (7)$$

式(6)一式(7)中:  $A_y$  为油管外径横截面积,  $m^2$ ;  $S$  为冲程,  $m$ ;  $N$  为冲次;  $A_p$  为抽油泵柱塞面积,  $m^2$ ;  $\eta$  为  $t$  时刻时泵效, %。

泵效与沉没度的理论研究主要采用数理统计、解析和仿真等方法<sup>[14]</sup>。通过对油田范围内抽油机井进行数理统计,得到泵效与沉没度拟合曲线(图2)。

$$\eta = 5.3513 \ln(L_b - L_{dc}) + 10.413 \quad (8)$$

式中:  $L_b$  为泵深,  $m$ 。

## 2 耦合数学模型初始条件及求解

式(1)一式(8)建立了间歇采油的动液面耦合数学模型,给定初始条件后,通过对常微分方程的龙

格-库塔方法进行迭代,具体步骤如图3所示。

第一步:根据式(1),设置初始条件  $t=0$ ,动液面在泵口,取  $Q_{\max}$  值为一系列不同值,并将计算结果与实测液面恢复曲线进行拟合,获取储层的地层参数  $Q_{\max}$ 。

第二步:在地层参数  $Q_{\max}$  拟合出来的基础上,根据式(2)、式(3)、式(4),将静液面至泵口设置不同的停抽深度、开井深度,用枚举法进行优化,最终从井口日产液量、地层日产液量、泵效、生产时间等方面入手,确定最优的间歇采油工作制度。

## 3 矿场应用及效果分析

南堡某井油层中部深度为 2 650 m,目前静液面位置为 1 400 m,油层渗透率为  $5 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,泵深为 2 400 m,泵径为 38 mm,间歇生产时冲程为 5 m,冲次

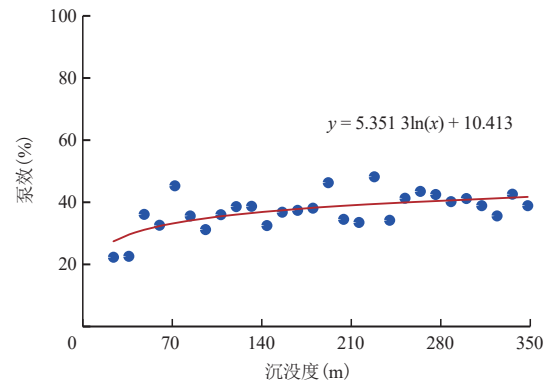


图2 单井泵效拟合曲线

Fig. 2 Pump efficiency curve

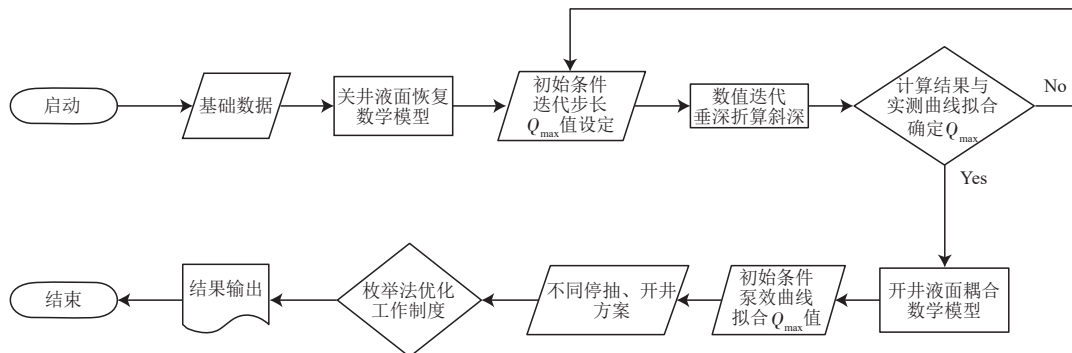


图3 数值迭代流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of numerical iteration process

为3,含水率为45%。由于供排关系不匹配,优化前采用关井24 h、开井12 h生产制度。

### 3.1 最大无阻流量 $Q_{\max}$ 拟合曲线

传统获取地层参数的方式主要是地层测试或者试井作业,这些方式普遍存在投入费用高、经济效益差等问题。而利用连续液面监测仪对关井时期动液面恢复曲线进行连续监测,并通过耦合数学模型的计算结果进行拟合,既能确保地层参数的精确性,现场使用过程又方便、快捷,经济成本低<sup>[15-20]</sup>。

### 3.2 方案优选及效果分析

根据最大无阻流量  $Q_{\max}$  拟合曲线以及沉没度泵效关系曲线,通过式(5)迭代计算结果与实测液面恢复曲线进行拟合,可以获取地层最大无阻流量  $Q_{\max}$  值为  $2.1 \text{ m}^3/\text{d}$ ,并在此基础上通过式(6)迭代计算,将计算结果绘制出不同动液面地层流入、流出曲线(图4、图5)。

图5为该井的流入、流出与动液面的关系曲线,

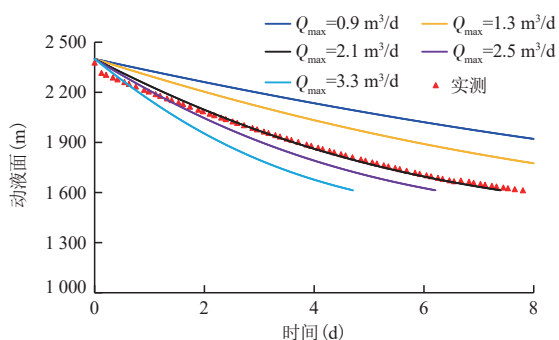


图4  $Q_{\max}$  拟合曲线  
Fig. 4  $Q_{\max}$  fitting curves

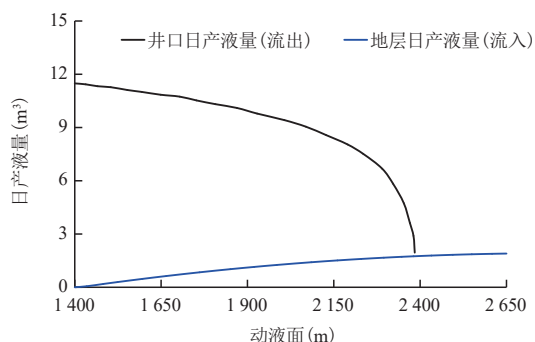


图5 某井流入、流出曲线  
Fig. 5 Well Inflow and outflow curves

两者供排是不匹配的。从曲线交汇点可以看出,虽然理论上日产液量能达到  $1.9 \text{ m}^3$ ,但其泵效仅为7.8%。然而,实际生产时井口日产液量仅为  $1.1 \text{ m}^3$ ,系统效率极低,造成设备磨损、管柱干磨严重,严重制约生产。因此,必须对该井进行间开生产。从图4和图5也可直观看出,井口日产液量、地层日产液量与动液面是动态耦合的、相互制约的。动液面较高时,随着动液面下降,初期泵排量下降较少,后期呈断崖式下降,相反,地层渗流量随之上升,当动液面下降至一定程度后,地层渗流量上升趋势也随之平缓。因此,需要优选出一个合理开关井动液面,既保证地层渗流量较高、关井恢复时间较短,又保证开井生产时泵排量较高且工作时间最短,确保地层与泵高效协同工作。

基于以上理论基础,利用枚举法将静液面至泵口深度进行等分,设置不同组合方案进行工作制度方案优化对比。从图6井口日产液量三维曲面图可以明显看出,开关井时动液面较高,井口日产液量总体而言较低,这是由于净液柱高度过高,导致井底流压高、渗流阻力大,这也和图5中地层日产液量曲线是匹配的。从三维曲面图可以看出,日产液量并不是一个光滑的曲面,部分区域井口日产液量存在高值。

将井口日产液量高值区域进行局部放大后(图7),可以看出开井动液面2 284 m、关井动液面2 336 m区间内,井口日产液量是最高的。这主要是由于开井时合理的沉没度使得抽油泵处于高效工作状态,生产时间短,很快进入高速地层恢复阶段,两者耦合后从而使得井口日产液量最高。

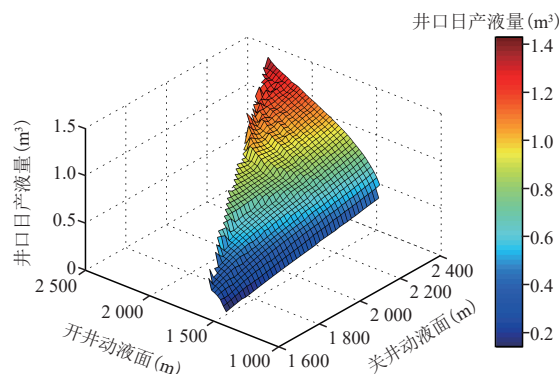


图6 井口日产液量三维曲面  
Fig. 6 3D surface of wellhead daily liquid production

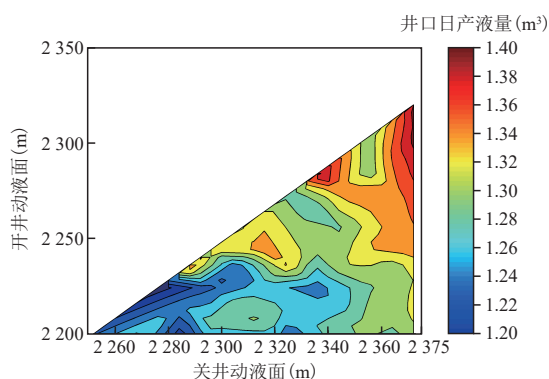


图7 井口日产液量等值线

Fig. 7 Contour line of wellhead daily liquid production

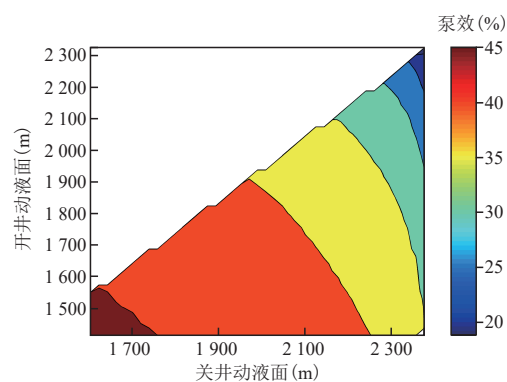


图8 泵效等值线

Fig. 8 Contour line of pump efficiency

从图8泵效等值线图中可明显发现,油井在间歇生产中泵效和动液面是动态耦合的,随着沉没度增加,泵效并不是呈直线上升,而是一个缓慢上升过程,这也进一步验证了泵效与沉没度关系理论,间歇生产时泵效并不一定是固定的常数,只有保证合理的沉没度时,才能使得地层与抽油泵高效协同工作。

从图9地层日产液量三维曲面图中可以看出,随动液面上升,渗流阻力增大,地层渗流量是逐步降低的,这与图5中地层流入、流出曲线相吻合,但是间歇生产并不是动液面越低越好,动液面越低,导致抽油泵效率呈断崖式下降,从而会导致井口产量降低。

根据式(1)一式(8)编制软件,对开关井动液面采用枚举法,确定间歇采油工作制度为开井动液面2284 m,关井动液面2336 m。与优化之前相比,月产液量提高 $9.3 \text{ m}^3$ ,综合泵效提高9.5%,月生产时间减少3.1 d。

## 4 结论

1) 结合物质平衡、流入流出动态等理论,建立了间歇采油动液面耦合数学模型,并与实测液面恢复资料进行拟合求取地层参数,在此基础上进行了间歇采油工作制度优化。这种方法具有形式简单、准确性较高、现场应用方便等特点,同时也为量化优化工作制度奠定了理论基础。

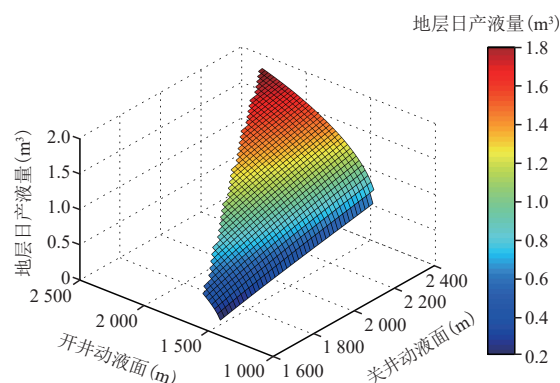


图9 地层日产液量三维曲面

Fig. 9 3D surface of daily formation liquid production

2) 由于每口井供排关系、井斜、泵况的差异化,需要采用一井一方案进行间歇采油工作制度确定。

3) 间歇采油工作制度的合理化,能确保地层与泵处于高效协同的供排状态,是低产低效井效益挖潜的重要手段。

### 参考文献

- [1] 张麦云,白学东,姚艳芳,等.低产油井间歇生产工作制度的确定方法[J].钻采工艺,2005,28(3):68-70.  
ZHANG Maiyun, BAI Xuedong, YAO Yanfang, et al. Method for intermittent production system in low production well[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(3): 68-70.
- [2] 雷群,赵卫国.低产井间歇抽油技术研究[J].钻采工艺,2001,24(2):20-21.  
LEI Qun, ZHAO Weiguo. A study on interval pumping

- technique in stripper well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2001, 24(2): 20-21.
- [3] 卢琳,李赣勤,王涛,等.低产油井间歇生产工作制度的研究与应用[J].断块油气田,2004,11(4):75-77.  
LU Lin, LI Ganqin, WANG Tao, et al. Study and application of intermittent production method system for low producing well [J]. *Fault-Block Oil & Gas field*, 2004, 11(4): 75-77.
- [4] 于小明,何贯中,金英兰.抽油机井间抽制度合理性研究[J].大庆石油地质与开发,2006,25(4):78-79.  
YU Xiaoming, HE Guanzhong, JIN Yinglan. Study on rationality of intermittent pumping system for pumping well[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(4): 78-79.
- [5] 唐鑫,杨兆中,李秀锦,等.低渗透油藏油井间开生产技术研究与应用[J].西南石油学院学报,2005,27(3):44-48.  
TANG Xin, YANG Zhaozhong, LI Xiujin, et al. Research and application of oil well interval pumping technology in low permeable reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(3): 44-48.
- [6] 熊友明.低压油井间歇抽油设计研究[J].西南石油学院学报,1995,17(3):92-96.  
XIONG Youming. Study on intermittent oil pumping design of low pressure oil wells[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 1995, 17(3): 92-96.
- [7] 李松岑.低产低效油井流入动态及合理间开工作制度研究[D].成都:西南石油大学,2014.  
LI Songcen. Study on inflow performance and reasonable interval working system of low production and low efficiency oil wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [8] 蒙晓灵,张宏波.低产油井间开模式定量化优化及应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(3):38-40.  
MENG Xiaoling, ZHANG Hongbo. Quantitative optimization of the intermittent production pattern of low producing oil wells and its applications[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2006, 21(3): 38-40.
- [9] 李婧.低渗透油藏油井间歇开采合理工作制度研[D].成都:西南石油大学,2013.  
LI Jing. Study on reasonable working system of intermittent production in low permeability reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [10] 周代余,梁政.低效油井合理间歇抽油制度设计方法研究[J].钻采工艺,2003,26(1):46-49.  
ZHOU Daiyu, LIANG Zheng. A New approach for determining the reasonable intermittent pumping period for low efficiency well [J]. *Drilling & Production Technology*, 2003, 26(1): 46-49.
- [11] 张丰峰,李军亮,姜毅,等.低产低效井合理间开制度研究[J].中国科技论文,2020,15(9):1071-1076.  
ZHANG Fengfeng, LI Junliang, JIANG Yi, et al. Research on reasonable intermittent production system of low production and low efficiency wells[J]. *China Sciencepaper*, 2020, 15(9): 1071-1076.
- [12] 孟也,李明波,李相方,等.低渗油藏低产油井间歇抽油参数优化设计[J].断块油气田,2020,27(2):268-272  
MENG Ye, LI Mingbo, LI Xiangfang, et al. Intermittent pumping design of low production oil wells in low-permeability reservoir[J]. *Fault-Block Oil & Gas field*, 2020, 27(2): 268-272.
- [13] VOGEL J V. Inflow performance relationships for solution-gas drive wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1968, 20(1): 83-92.
- [14] 李方健.低渗透油藏间歇开采工作制度优化研究[D].东营:中国石油大学(华东),2017.  
LI Fangjian. Study on optimization of intermittent pumping working system in low permeability reservoir[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [15] 陈岩,王新海,张磊,等.利用抽汲井液面恢复资料进行试井解释[J].科学技术与工程,2013,13(17):4769-4778.  
CHEN Yan, WANG Xinhai, ZHANG Lei, et al. Flow mathematic model and exact solution of swabbing well's fluid level build-up[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(17): 4769-4778.
- [16] 韩凤蕊,林加恩,孙景丽.一种基于液面资料的试井分析方法[J].断块油气田,2004,11(6):83-85.  
HAN Fengrui, LIN Jia'en, SUN Jingli. The method of well testing analysis based on annulus liquid level data[J]. *Fault-Block Oil & Gas field*, 2004, 11(6): 83-85.
- [17] 任涛,张鑫,孙文,等.基于粒子群算法的间歇采油机制优化[J].断块油气田,2020,27(4):541-544.  
REN Tao, ZHANG Xin, SUN Wen, et al. Optimization of intermittent recovery mechanism based on particle swarm calculation[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(4): 541-544.
- [18] 李明江,黄天虎,吴利利,等.基于油井示功图的低产低效井间开技术研究及应用[J].石油化工自动化,2020,56(2):83-85.  
LI Mingjiang, HUANG Tianhu, WU Lili, et al. Research and application of low production and efficiency interval pumping technology based on oil well dynamometer card[J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2020, 56(2): 83-85.
- [19] 张鑫,高旺雄,杜永波,等.浅谈数据挖掘在油田开采中的应用方法[J].云南化工,2019,46(10):155-156.  
ZHANG Xin, GAO Wangxiong, DU Yongbo, et al. The application of data mining in oilfield exploitation is briefly discussed[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(10): 155-156.
- [20] 于镛,宋盛瑶,任伟建,等.油田开采智能评价有用规则提取方法[J].东北石油大学学报,2016,40(3):111-117.  
YU Di, SONG Shengyao, REN Weijian, et al. Investigation into useful rule extracting for intelligent evaluation of oilfield production[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2016, 40(3): 111-117.