

文章编号: 0253-2697(2009)02-0263-04

# 井底压力波动对稠油产量影响机理实验

杨大刚<sup>1</sup> 杨浩<sup>2</sup> 杨进<sup>2</sup> 周长所<sup>2</sup> 石磊<sup>2</sup> 翟慧颖<sup>2</sup>

(1. 大庆石油学院石油工程学院 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 北京 102249)

**摘要:** 国内一些稠油油田生产过程中将抽油泵更换成螺杆泵后产水减少,产油量增加,而该方法在稀油油藏应用,其产量变化不明显。为此,用实验模拟方法研究了井底压力波动对稠油生产的影响。在恒压条件下,将稠油和地层水同时注入饱和油的人造岩心中,模拟近井地带油藏在泵抽吸作用下油水两相流动特征,利用出口端的电磁阀产生和不产生周期性波动来分别模拟抽油泵和螺杆泵的生产过程。由产油、产水情况发现,波动状态下产水量高于不波动情况,而前者产油量小于后者,且随波动周期的增加,产水率增加而产油率减少。即抽油泵生产过程中压力波动增加了水的产出量;而螺杆泵连续地抽吸减少了水的产出量,增加了稠油产量。稠油开发中使用螺杆泵的效果优于抽油泵。

**关键词:** 螺杆泵; 抽油泵; 压力波动; 稠油; 产油量; 采水率; 实验研究

中图分类号: TE345

文献标识码: A

## Experimental simulation on influence of bottom hole pressure fluctuation upon heavy oil outcome

YANG Dagang<sup>1</sup> YANG Hao<sup>2</sup> YANG Jin<sup>2</sup> ZHOU Changsuo<sup>2</sup> SHI Lei<sup>2</sup> ZHAI Huiying<sup>2</sup>

(1. Faculty of Petroleum Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 2. Key Laboratory for Petroleum Engineering of the Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In some domestic heavy oil fields, water production decreased and oil production increased after oil well pump replaced by progressive cavity pump, but this method is unavailable in thin oil fields. An experiment was made to simulate the influence of pressure fluctuation at bottom hole on heavy oil outcome. Under the condition of constant pressure, heavy oil and formation water were simultaneously pumped into oil-saturated artificial core to simulate two-phase flow of oil and water in the reservoir. A solenoid valve was used in the exit to cause periodic pressure fluctuation. The liquid producing capacity was observed and compared with that of the non-fluctuated. It was discovered that the pressure fluctuation could increase water production, but it could decrease oil production. The comparison of in-situ productions using oil well pump and progressive cavity pump showed that the progressive cavity pump was superior to oil well pump for development of heavy oil.

**Key words:** progressive cavity pump; oil well pump; pressure fluctuation; heavy oil; oil outcome; water cut; experimental study

## 1 实验设计

### 1.1 实验原理

为了研究波动对稠油流动的影响,实验中使用恒压阀产生恒定压力,将稠油和水注入岩心,模拟一定地层压力的地层流体(油水)通过岩心流入井筒。如果进入井筒的流体多于抽汲出的流体,则井筒就处于自喷阶段;如果进入井筒的流体少于产出的流体,则处于干抽状态。假设一定时间内从地层进入井筒的流体刚好被抽油泵抽完,出口端接上电磁阀,周期性的打开或关闭出口端,这样可以产生波动压力,模拟抽油泵生产过程产生波动的情形;关闭电磁阀可模拟螺杆泵抽油

过程。

### 1.2 实验装置及实验流程

实验装置主要由恒压系统、供给系统、恒温箱、岩心夹持器、电磁阀和流量计量等部分组成(图1):①恒压系统是由气源、气瓶以及控制压力的减压阀和恒压阀组成。其中减压阀的作用是将气源中高压的气体导入压力比较低的气瓶,提供气体供给,保持气瓶压力的稳定,但不够准确;恒压阀的作用是将气瓶中气体压力降到实验压力,并保持压力恒定,从而准确控制驱替压力;②供给系统由两个相同的中间容器组成,其中一个中间容器装稠油,另一个装地层水,分别模拟油水层;③整套装置都在恒温箱内,误差为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ,恒温箱的温

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB705800)资助。

作者简介:杨大刚,男,1964年10月生,1988年毕业于大庆石油学院,现为大庆石油学院石油工程学院副教授,在读博士研究生,主要从事油田开发方面的研究。E-mail: cyjin1018@vip.sina.com

度根据稠油油藏地层的温度设定为  $50^{\circ}\text{C}$ ; ④使用人造岩心, 水测渗透率在  $(40\sim 300)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  之间, 外径为  $2.5\text{cm}$ , 岩心长度在  $6\sim 9\text{cm}$  之间; ⑤利用电磁阀产生波动压力; ⑥由于稠油体积用量筒不易准确计量, 因此采用溶剂抽提蒸馏法计算产出油水量。稠油和水采用油田现场提供的样品, 测得  $50^{\circ}\text{C}$  时、剪切速率为  $10\text{s}^{-1}$  下稠油黏度为  $670\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。现场取回的稠油在一定压力下通过过滤装置, 去除其中的杂质, 避免在管线或岩心中堵塞; 取回的地层水用 G5 玻璃砂芯漏斗过滤, 去除其中的悬浮稠油, 避免油、水计量不准确。

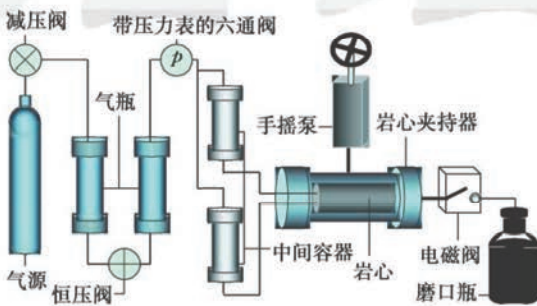


图1 波动对产量影响实验装置示意图

Fig. 1 Experimental equipment sketch map about the effects of fluctuation on production

具体实验步骤如下:

(1) 将钻取的人造岩心烘干 ( $24\text{h}$ ), 放到玻璃瓶中冷却, 抽空饱和地层水, 而后放入岩心夹持器, 先用地层水将管线中的气驱走, 减少实验误差;

(2) 将稠油注入岩心中, 至出口无油时继续注入  $1\text{PV}$  稠油, 使岩心充分饱和稠油, 模拟地层情况;

(3) 将调试准确的恒压阀和减压阀根据岩心渗透率的大小设定一个恒压值, 一般岩心渗透率越大, 设定的压力越小, 但必须大于岩心稠油的启动压力。本实验设定的压力值分别为  $0.3\text{MPa}$ 、 $0.4\text{MPa}$ 、 $0.6\text{MPa}$  和  $0.8\text{MPa}$ ;

(4) 打开六通阀, 设定压力的气体进入中间容器活塞下部, 驱动中间容器上部的油水流出, 当油水在岩心夹持器进口端都出来后接上岩心夹持器, 这样油水将同时被驱入岩心, 且在岩心进口端混合而压力相同, 出口压力为大气压, 使油水在相同的压差下流动, 充分模拟地层油藏油水恒压流动情况;

(5) 待油水流动稳定后, 周期性地关闭或打开电磁阀, 模拟抽油泵抽油时周期性的波动过程, 待产油和产水量稳定后, 准确计量流出的水量和油量, 与未波动情况进行比较, 研究波动对油水流动的影响。在本实验中周期分别设定为  $20\text{s}$ 、 $30\text{s}$  和  $40\text{s}$ ;

(6) 当进口压力表和出口压力表稳定后, 岩心的油水流动稳定, 采用蒸馏抽提和称重的方法准确计量

磨口瓶中的产油量和产水量, 当产油量和产水量达到稳定时, 测得该稳定压力下的产油、产水量;

(7) 改变恒压值继续测量。

## 2 实验结果

### 2.1 饱和稠油的岩心流动特性

将饱和稠油的岩心放入岩心夹持器, 设定恒压值, 开启六通阀, 气体进入中间容器下部, 驱替油水进入岩心, 压力梯度为  $4.8\text{MPa/m}$ , 岩心渗透率为  $266\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 产液量情况如图 2 所示。

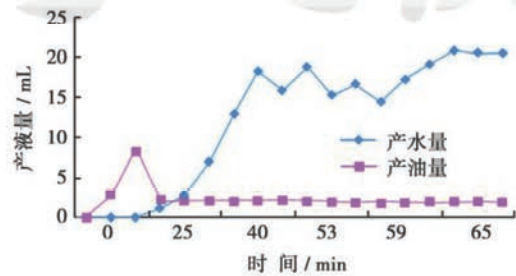


图2 饱和稠油的岩心流动特性曲线

Fig. 2 Flow characteristic curve of the core sample saturated oil

从图 2 可见, 油水同时到达岩心进口端后, 饱和油的岩心在初始阶段油开始不断被驱出并在一定时间内达到峰值, 此时因出口压力很小 (几乎为 0), 无法开启电磁阀进行压力波动。见水后, 由于大部分油已经被水驱出, 同时油水的高流速比使产油量减少, 而产水量迅速增加, 经过一段时间后油水相互建立稳定的流通道, 油水比趋于稳定, 此时, 间隔  $1\text{min}$  记录一次产油、产水情况。此即模拟螺杆泵稳定抽油过程。

### 2.2 岩心在波动压差下的流动特性

待油水流动稳定后, 启动电磁阀产生压力波动, 这样可以模拟波动情况下的油水流动情况。一般抽油泵抽油周期约为  $30\text{s}$ , 实验中分别打开电磁阀  $10\text{s}$ 、 $15\text{s}$ 、 $20\text{s}$ , 再分别关闭电磁阀  $10\text{s}$ 、 $15\text{s}$ 、 $20\text{s}$ ,  $2\text{min}$  测量一次数据, 这样可以模拟波动周期分别为  $20\text{s}$ 、 $30\text{s}$ 、 $40\text{s}$  的波动实验。不波动的情况刚好和波动情况  $2\text{min}$  记录一次的实际生产时间相同。直到产油、产水稳定, 停止该周期下的实验, 继续进行下周期的波动。其中, 压力梯度为  $7.6\text{MPa/m}$ , 岩心渗透率为  $272\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 实验结果见图 3 和图 4。

从图 3 和图 4 可看出, 随着波动周期的增加, 产水量上升, 产油量下降; 压力不波动情况比波动情况产油多, 而产水少。

在压力梯度为  $13.4\text{MPa/m}$ , 岩心渗透率为  $266\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  情况下, 测量波动压力与波动周期的关

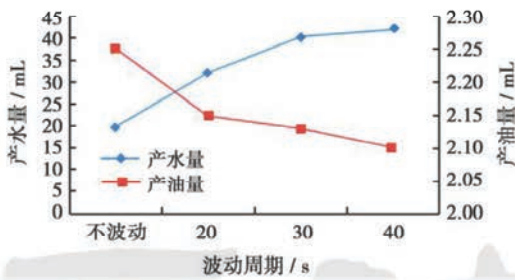


图 3 不同波动周期下的产液量曲线

Fig. 3 Liquid production in different cycle of fluctuation

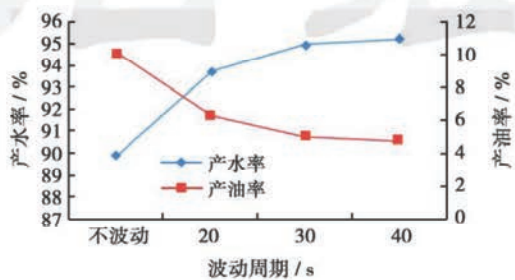


图 4 不同波动周期下的产液率曲线

Fig. 4 Liquid production rate in different cycle of fluctuation

系, 实验结果见图 5。从图 5 可见, 随着波动周期的增加, 岩心压力波动幅度增加, 这是由于周期越长, 岩心注入端和岩心出口端进行压力传递, 前后端压力差变小, 即出口端压力升高, 压力波动幅度增加。可见, 在一定波动周期条件下, 注入压力越大, 波动压力就越大。

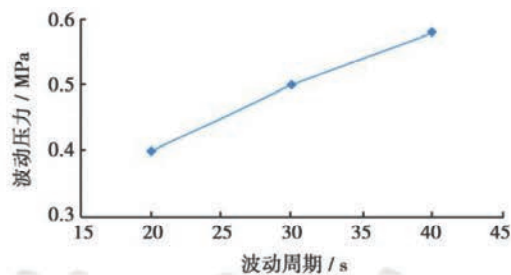


图 5 波动压力与波动周期的关系

Fig. 5 Relationship between fluctuation pressure and fluctuation cycle

### 3 波动对稠油产量的影响

#### 3.1 稠油流动分析

稠油在近井地带中流动, 在抽油泵的周期性抽汲下, 岩心形成一定的堵塞。由于稠油含有沥青、胶质、石蜡等物质, 流体具有非牛顿流体的性质, 其黏度随剪切应力而变化。原油中胶质、沥青和石蜡一类的高分子化合物容易形成空间网状, 这种结构在原油流动时一部分被破坏, 破坏的程度与流动速度有关<sup>[1-4]</sup>。当原

油静止时, 结构得以恢复; 重新流动时, 渗流发生滞后现象。原油的这种非牛顿性质直接影响驱油效率和波及系数, 使原油的采收率降低。要提高原油的采收率须改善异常原油的流变性, 降低其黏度和极限剪切应力<sup>[5-8]</sup>。在抽油泵抽油的过程中, 随着抽油杆上、下运动, 一定时间内近井地带的稠油以一定速度向井筒流动, 由于井筒沉没度的增加, 近井地带的稠油使井底压力增加, 流动速度减慢, 引起油滴的滞留。要启动它必须克服附加毛管阻力。由于抽油泵活塞的这种周期性的运动, 稠油不断聚集, 出砂严重时还可能发生砂堵, 同时由于抽油泵的间隙漏失和阀漏失, 影响了泵效, 造成在一个周期内一定时间近井地带的原油停止流动, 结构恢复, 从而导致采收率降低。

螺杆泵连续的抽汲避免了稠油结构的恢复, 同时转子的转动对稠油有剪切稀释的作用, 而转子在定子橡胶衬套内的运动带有滚动和滑动的性质, 使油液中的砂粒不易沉积, 减少或避免了稠油在近井地带的堵塞, 同时转子一定时间内容积的均匀变化而产生的抽汲、推挤作用使油气混输效果好。

实验中使用的岩心比较短, 如果增加岩心长度, 波动对稠油停滞造成的影响会更加明显, 在现场实际生产中波动会使产水量明显增加而产油量降低。

#### 3.2 实际生产分析

针对国内某稠油油田生产过程中出现的抽油泵更换成螺杆泵后产水量减少, 产油量增加, 根据实际生产数据, 抽油泵与螺杆泵产液量的比值在 0.5~2 之间, 分析抽油泵与螺杆泵生产方式, 结合产量公式

$$Q = J_o(p_r - p_{wf})$$

式中:  $Q$  为油井产液量,  $m^3/s$ ;  $J_o$  为采油指数,  $m^3/(s \cdot Pa)$ ;  $p_r$  为油藏生产压力,  $Pa$ ;  $p_{wf}$  为井底流动压力,  $Pa$ 。

采油指数  $J_o$  不变, 而抽油泵在生产过程中因有半个周期抽油杆下行而没有产液, 由此在抽油泵生产过程中, 生产时间内产量比螺杆泵多, 依据产量公式, 抽油泵的生产压差是螺杆泵生产压差的 1~4 倍, 而稠油油藏中生产压差越大, 产水量越大<sup>[9]</sup>, 造成抽油泵生产产水率高, 这与波动实验结论一致。

### 4 结论

(1) 在恒压条件下, 将稠油和地层水同时注入饱和和油的人造岩心中, 利用出口端的电磁阀, 实现了周期性波动过程的模拟。通过实验, 模拟了矿场的生产情况。

(2) 利用抽油泵与利用螺杆泵开采稠油, 螺杆泵连续的抽汲, 稠油更容易形成稳定的流动油带, 驱油效

率高;抽油泵会由于压力的波动而导致更高的含水率。使用螺杆泵开采稠油优于使用抽油泵开采稠油。

## 参 考 文 献

- [1] 宫敬,王玮,于达.稠油-水两相水平管流型实验研究[J].石油学报,2007,28(2):140-143.  
Gong Jing, Wang Wei, Yu Da. Experimental study on flow patterns of heavy oil-water two-phase flow in horizontal pipes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 140-143.
- [2] 胡合贵,戚国荣,高建厂,等.不同分子结构星形降凝剂对油品降凝、降粘性能的影响[J].石油学报(石油加工),2000,16(1):40-46.  
Hu Hegui, Qi Guorong, Gao Jianchang, et al. Effects of star-shaper pour point depressants on pour point depression and viscosity reduction of crude oils and their products[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2000, 16(1): 40-46.
- [3] 王大喜,赵玉玲,潘月秋,等.稠油破乳作用机理的量子化学和分子力学研究[J].石油学报(石油加工),2007,23(5):66-70.  
Wang Daxi, Zhao Yuling, Pan Yueqiu, et al. Study of quantum chemistry and molecular mechanics on action mechanism of demulsifier at crude oils[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2007, 23(5): 66-70.
- [4] 赵杉林,毛燎原,张起凯,等.海水稀释-微波辐射协同作用高稠油脱水研究[J].石油学报(石油加工),2007,23(2):62-66.  
Zhao Shanlin, Mao Liaoyuan, Zhang Qikai, et al. Study on the dehydration of high-viscosity oil under joint action of seawater dilution and microwave radiation[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2007, 23(2): 62-66.
- [5] 尉小明,刘喜林,郭占文,等.辽河油田超稠油掺活性水降粘先导性试验[J].石油学报,2006,27(4):119-121.  
Wei Xiaoming, Liu Xilin, Guo Zhanwen, et al. Pilot test for viscosity reduction of ultra-heavy oil by blending active water in Liaohe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 119-121.
- [6] 谢文彦,李晓光,陈振岩,等.辽河油区稠油及高凝油勘探开发技术综述[J].石油学报,2007,28(4):145-150.  
Xie Wenyan, Li Xiaoguang, Chen Zhenyan, et al. Review of exploration and development technologies for heavy oil and high pour-point oil in Liaohe oil region[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 145-150.
- [7] 沈德煌,张义堂,张霞,等.稠油油藏蒸汽吞吐后转注CO<sub>2</sub>吞吐开采研究[J].石油学报,2005,26(1):83-86.  
Shen Dehuang, Zhang Yitang, Zhang Xia, et al. Study on cyclic carbon dioxide injection after steam soak in heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 83-86.
- [8] 王春明,李大平,刘世贵.稠油开采微生物的生理生化特征及其对原油特性的影响[J].石油学报,2007,28(5):89-92.  
Wang Chunming, Li Daping, Liu Shigui. Effects of biophysiological and biochemical characteristics of a strain of microbacterium sp. on properties of thickened oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 89-92.
- [9] 杨浩,杨进,周长所,等.稠油在不同压差下的流动机理实验研究[J].石油钻采工艺,2007,29(5):33-34.  
Yang Hao, Yang Jin, Zhou Changshuo, et al. Experimental research on flow mechanism of heavy oil under variable pressure differences[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(5): 33-34.

(收稿日期 2008-04-13 改回日期 2008-06-12 编辑 黄小娟)

## (上接第 262 页)

- Feng Jian, Liu Honglai, Hu Ying. Meso-structures of complex systems and dissipative particle dynamics simulations[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 27(2): 105-110.
- [15] Yuan Shiling, Cai Zhengting, Xu Guiying, et al. Mesoscopic simulation study on phase diagram of the system oil/water/aerosol OT[J]. Chemical Physics Letters, 2002, 365(3/4): 347-353.
- [16] Chen Zhengxia, Cheng Xiuli, Cui Haishi, et al. Dissipative particle dynamics simulation of the phase behavior and microstructure of CTAB/octane/1-butanol/water microemulsion[J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 301(1/3): 437-443.
- [17] Chen S, Phan-Thien N, Fan X J, et al. Dissipative particle dynamics simulation of polymer drops in a periodic shear flow[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2004, 118(1): 65-81.
- [18] Frenkel D, Smit B. Understanding molecular simulation: From algorithms to applications[M]. New York: Academic Press, 1996: 443.
- [19] Visser D C, Hoefsloot H C J, Iedema P D. Comprehensive boundary method for solid walls in dissipative particle dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 205(2): 626-639.
- [20] Igor V Pivkin, George Em Karniadakis. Controlling density fluctuations in wall bounded dissipative particle dynamics systems[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(20), 206001.
- [21] Altenhoff A M, Walther J H, Koumoutsakos P. A stochastic boundary forcing for dissipative particle dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225(1): 1125-1136.

(收稿日期 2008-07-17 改回日期 2008-10-22 编辑 张怡)