

文章编号: 0253-2697(2009)01-0080-04

# 多油层油藏分层注水稳产条件与井网加密调整

王家宏

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:** 实现注水开发油田的稳产,须提高产液量,以弥补产油量的下降。当现有的井网适应性变差,提高产液量受到限制时,就应该进行井网加密调整以增加井点数改善油层动用状况,来提高产液量。提高产液量是实现油田稳产的基本条件,井网加密调整,提高水驱控制程度,增加可采储量则是实现油田稳产的必要条件。油田稳产的5个要素包括含水率、产液量、井网密度、注水量及注水时机。以含水率与产液量关系建立了油田稳产方程,表述了不同含水阶段实现油田稳产的技术界限。根据统计规律提出了井网密度与可采储量增长率表达式,该计算式可用于预测不同开发阶段井网加密调整可采储量的增幅。对保持产液量稳定增长的宏观注水原则进行了论述。

**关键词:** 多油层油藏; 分层注水; 稳产条件; 井网加密; 可采储量; 产液量; 含水率; 注水量

中图分类号: TE341

文献标识码: A

## Stable production conditions and well pattern infilling for development of multilayered reservoir with separate zone water injection

WANG Jiahong

(PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Increasing liquid production is considered as the basic condition for stabilizing oilfield production with water injection. When the current well pattern adaptation becomes worse, well pattern infilling should be implemented to support and ensure oilfield stable production. If increasing liquid production is considered as the basic condition for oilfield stable production, well pattern infilling, improvement of control degree of water flooding and increasing recoverable reserves are the prerequisites for it. The key elements for stabilizing production include water cut, liquid production capacity, well spacing density, water injection rate and timing of water injection. The formula for stabilizing production which is established on the correlation between water cut and liquid production rate can describe the technical limit for stable production of oilfields with different water cut at different stages. The correlation formula between well spacing density and incremental rate of recoverable reserves was proposed with the statistics method. The formula can be used to predict the increment of recoverable reserves using well pattern infilling method in different development stages of waterflooding oilfield. The macroscopic water injection technology was discussed for sustaining stable production of oilfield.

**Key words:** multilayered reservoirs; separate zone water injection; stable production condition; well pattern infilling; recoverable reserve; liquid production capacity; water cut; water injection rate

我国油田开发方案设计,要求有一定的稳产期以保证油区产量规模和持续发展<sup>[1-2]</sup>,而不能按最大生产能力来设计油田的生产规模。油田开发过程中,高产与稳产常常是一对矛盾。实现油田的稳产,就要进行井网加密调整,增加可采储量,动用尚未动用的生产能力。笔者重点对5个要素:含水率、产液量、井网密度、注水量和时机与油田稳产的关系进行了研究。

### 1 稳产条件

一个油田要实现年产油量的稳定,第二年的无因次产液量应满足:

$$q_{DL} = \frac{1-f_{w1}}{1-f_{w2}} \quad (1)$$

$$q_{DL} = \frac{q_{L2}}{q_{L1}} \quad (2)$$

式中:  $q_{DL}$  为第二年的无因次产液量, 小数;  $f_{w1}$  为第一年平均含水率, 小数;  $f_{w2}$  为第二年平均含水率, 小数;  $q_{L1}$  为第一年产液量,  $10^4$  t;  $q_{L2}$  为第二年产液量,  $10^4$  t。

从式(1)看出, 如果第二年的含水率不上升, 保持第一年的水平, 第二年的产液量与第一年的产液量相同就可实现稳产。如果第二年的含水率上升, 需要增加一部分产液量来补充因含水率上升造成的产油量的

下降。含水率上升越快, 则无因次产液量增幅越大。油田开发过程中无论处于哪个开发阶段, 只要第二年的无因次产液量能满足式(1)要求, 即可实现油田稳产。

无因次产液量主要决定于含水率上升速度, 以每采出地质储量 1% 时的含水率上升值  $F$  表示含水上升的快慢:

$$q_{DL} = \frac{1 - f_{w1}}{1 - f_{w1} - (\Delta R \times F)/100} \quad (3)$$

式中:  $\Delta R$  为第二年与第一年采出程度之差, %;  $F$  为含水上率, %。

根据式(3)绘制含水上率与无因次产液量关系曲线(图 1), 从关系曲线可以看出, 当含水上率一定时, 随采油速度的提高无因次产液量上升加快。

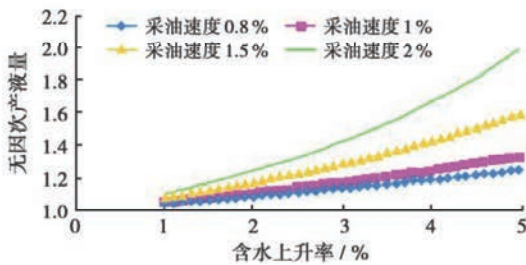


图 1 不同采油速度下含水上率与无因次产液量的关系

Fig. 1 Relation of water cut increasing rate with dimensionless liquid production rate for different oil recovery rates

## 2 提高产液量的技术措施

注水开发油田的采液指数随含水变化规律分为稳定上升和初、中期下降两种类型。前者产液量随含水率上升而增加, 后者产液量随含水率上升而下降。无论哪种类型提高产液量, 都需要放大生产压差, 其做法是提高地层压力或降低流动压力。大庆喇萨杏油田在 1983 年以后全面转变开采方式, 由自喷改为人工举升, 目的就是降低流动压力, 放大生产压差以提高产液量<sup>[3]</sup>, 而提高地层压力的做法因受到地层破裂压力的限制, 难以长期实现。

油田开发初期在采油指数、工作制度和加密井网 3 个方面还存一定潜力。采油指数包括注水受效、渗透阻力降低和含水率上升、采液指数变化, 另外还包括油层改造措施后导流能力的提高<sup>[4]</sup>; 工作制度的潜力除正常的放大生产压差外, 重点是开采方式的改变, 由自喷转为人工举升开采是提高产液量的重要措施。井网加密调整是油田稳产的根本措施, 特别适宜初、中期采液指数随含水率上升而下降的油田。

### 2.1 井网加密调整提高对储量的控制程度

我国注水开发的油田初期, 一般采用的是面积注

水井网, 井距为 300~500 m, 单井控制地质储量为  $(10 \sim 50) \times 10^4 \text{t}$ , 井网对油层的水驱控制程度可达 70% 以上。由于初期井网对储量的控制程度低, 不能满足采收率要求, 只有对原井网进行加密调整, 才能提高油田水驱采收率<sup>[5]</sup>, 达到开发要求。井网加密调整提高水驱采收率对原井网不是简单的缩小井距, 而是在储量动用状况分析的基础上, 对原开发层系中动用差的油层, 单独组成一套井网, 缩小井距、完善注采系统<sup>[6]</sup>, 增加注水井比例, 调整注采井数比。井网加密调整可以把水驱控制程度提高到 90% 以上, 从而实现以增加可采储量为主的调整目的。

### 2.2 单井控制储量与可采储量增长率的关系

注采井网直接影响油藏的水淹体积, 井网密度是决定水淹体积的主要因素。

每增加一口加密调整井时可采储量增长值, 称为可采储量增长率。图 2 为典型油田的单井控制储量的倒数与可采储量增长率关系曲线。从图 2 可以看出, 可采储量增长率变化属于递减型的幂函数, 相关系数高。可采储量增长率随全油田总井数的增加而减小, 与井网密度成反比, 与单井控制储量的倒数成反比, 单井控制储量越小, 可采储量增长率越低。

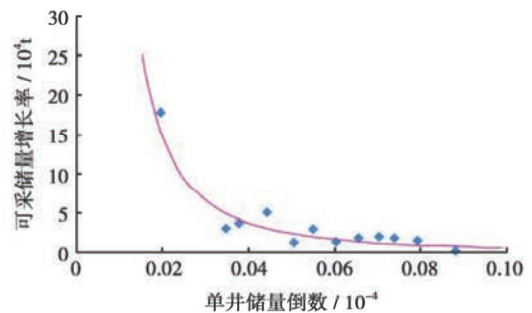


图 2 典型油田单井控制储量的倒数与可采储量增长率关系

Fig. 2 Relation of reciprocal of single well controlled reserves with incremental rate of recoverable reserves

对 23 个油田的可采储量增长率变化趋势进行分析, 结果表明, 可采储量增长率变化趋势均属于递减型的幂函数(图 3)。综合上述有代表性的油田资料, 建立了单井控制储量的倒数与可采储量增长率方程

$$\Delta N_{rw} = A \times \left( \frac{1}{N_w} \right)^m \quad (4)$$

其中

$$A = a \times N^m \quad (5)$$

式中:  $\Delta N_{rw}$  为可采储量增长率,  $10^4 \text{t}$ ;  $a$  为递减型的幂函数的系数;  $m$  为递减型的幂函数的指数;  $N$  为地质储量,  $10^4 \text{t}$ ;  $N_w$  为单井控制地质储量,  $10^4 \text{t}$ ;  $A$  为可采储量增长率方程系数。

从图 3 可以看出: 曲线有 3 个特点: ①在可采储量增长率约为  $2 \times 10^4 \text{t}$ , 基本上处于转折点, 曲线向右, 随

单井控制储量的减小曲线下降幅度变缓;曲线向左,随单井控制储量的加大曲线上升幅度变陡。②在可采储量增长率  $8 \times 10^4 \text{t}$  为曲线有效区的上限值。③在可采储量增长率  $0.1 \times 10^4 \text{t}$  为曲线有效区的下限值。

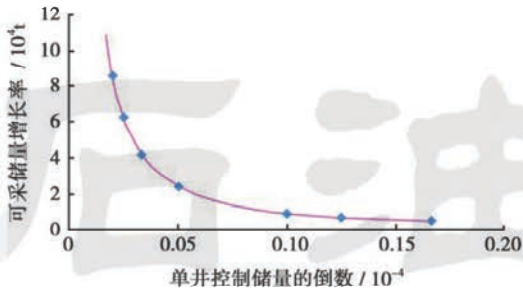


图3 综合性单井控制储量的倒数与可采储量增长率关系  
Fig. 3 The correlation between reciprocal of comprehensive single well controlled reserves and incremental rate of recoverable reserves

当可采储量增长率为  $2 \times 10^4 \text{t}$ , 相对应的单井控制储量在  $(10 \sim 20) \times 10^4 \text{t}$  左右时, 进行井网加密调整, 可

采储量增长率较高; 当接近曲线有效区的下限值, 相对应的单井控制储量在  $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{t}$  以下时, 进行加密调整, 可采储量的增加幅度很小。

该曲线的变化趋势可以作为不同开发阶段, 钻加密调整井可采储量增幅预测。

### 3 井网加密调整时机

整体开发、储量一次动用的油田, 通过井网加密调整提高产液量、控制含水上升幅度, 从本质上来讲是通过井网加密调整提高对油层的控制程度, 改善油层动用状况, 增加可采储量。由于含水上升幅度得到控制, 实现稳产的产液量增长幅度也可以低一些, 对延长稳产期有利。增加可采储量不但与井网密度有密切的关系, 而且与油田所处的开发阶段有关, 特别是与剩余油的分散程度有关。因此, 要提高井网加密调整的效果也存在调整时机问题。

表1给出已实现稳产的9个油田的参数, 稳产时间分别为4~14年, 从表中数据看出:

表1 油田稳产参数

Table 1 Related parameters of oilfield with stable production

油田	平均空气渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	稳产期/a	实际无因 次产液量	理论无因 次产液量	储采平 衡系数	稳产期增 长率/ $10^4 \text{t}$	稳产期初 含水率/%	可采储量 速度/%
HX	1 327	8	1.05	1.04	1.0	1.5	68.53	4.02
PT	107	6	1.15	1.15	0.9	1.9	28.85	3.24
XS	373	8	1.02	1.02	1.2	2.5	75.70	2.58
SL	631	14	1.05	1.05	0.9	2.9	74.52	2.37
CN	942.8	5	1.12	1.06	1.2	4.2	17.70	7.00
ML	75	4	1.08	1.07	0.7	0.9	20.60	3.13
TP	219	4	1.18	1.13	2.1	2.8	16.20	3.61
GT	213	5	1.16	1.16			8.20	5.02
QA	5	4	1.82	1.32	0.8	0.8	29.40	4.43

(1) 9个油田稳产期的实际无因次产液量与按式(1)计算的理论无因次产液量相比, 均为相等或大于理论的无因次产液量。说明笔者建立的稳产条件计算式是正确的, 可以用于实现稳产的产液量预测。

(2) 有8个油田主要是靠井网加密调整实现了可采储量增长与稳产, 其储采平衡系数为0.8~2.1。另外GT油田投产后主要依靠在采液指数上升的情况下, 调整生产工作制度来实现稳产。

(3) 两个低渗透油田<sup>[7]</sup>的可采储量增长率较低, 在  $1 \times 10^4 \text{t}$  以下, 单井控制储量相对低一些, 在  $10 \times 10^4 \text{t}$  左右。其他6个中、高渗透油田的可采储量增长率在  $1.5 \times 10^4 \text{t}$  以上, 单井控制储量相对高, 在  $15 \times 10^4 \text{t}$  以上。

(4) 从6个中、高渗透油田的稳产期所处的开发阶段来看, 有3个大油田由于上产时间较长, 稳产第一

年已进入高含水, 其他3个油田均为低含水。可以看出, 处于低含水状态比处于高含水状态可采储量增长率高, 开发调整效果更好。

油田稳产模式和稳产时间是由开发方案确定的。开发方案设计中, 油田稳产是通过数值模拟逐步放大生产压差实现的。因此, 井网加密调整的稳产期是开发方案设计中油田稳产期的延续, 井网加密调整的最好调整时机是开发方案设计的稳产期限时刻。低渗透油藏由于采取了机械采油方式, 工作制度调整余地很小, 基本没有稳产期, 此时就是最佳时机。从单井控制储量与可采储量增长率变化曲线看出, 在可采储量增长率大于  $2 \times 10^4 \text{t}$ , 即在单井控制储量为  $(10 \sim 50) \times 10^4 \text{t}$  时进行井网加密调整更为合理。井网加密调整的目的是以增加可采储量为主, 还须做更具体及细致的工作, 包括在油藏精细描述<sup>[8]</sup>的基础上对油层的动用

状况、水淹状况和剩余油分布的深入研究等。

## 4 注水原则

在注水与采油的井层间,建立有效的压力梯度,油井才能见到注水效果。中、高渗透多油层油藏注水开发过程中,可能出现注采平衡而地层压力仍下降(图4),或注采欠平衡而地层压力仍能稳定的情况,这主要是由于层间关系不协调引起的。要实现产液量稳定必须做到注采和压力两个平衡。

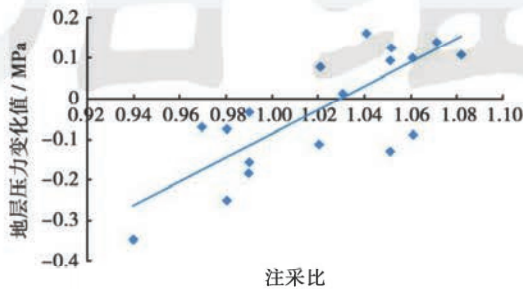


图4 注采比与地层压力变化关系曲线

Fig. 4 The relation of injection-production ratio with variation of reservoir pressure

分层注水的优势在于针对物性不同、水淹动用状况不同的油层,在注水强度上可以区别对待,为注水调整留出很大的空间。注水调整的目的是保持产油量稳定,为此要控制含水率上升速度,这样才能降低产液量的增幅。产液量增幅过大,造成采油和地面集输处理能力的扩建,经济效益变差。保持地层压力及含水的缓慢上升是重要的手段,产油量稳定才是目的。当地层压力和含水率的变化出现矛盾时(如地层压力稳定上升的同时,含水率上升过快),就要调整注水量,这不是简单地降低而是进行分层注水系列调整:①注水层段细分、封隔器双卡。②注水层段按其性质及主要受效方向的水淹状况进行分类。③根据注水层段性质、类型,按层段注水强度对数正态分布、变异系数为常数<sup>[9]</sup>的规律要求,优化注水层段注水量,使总注水量随产液量的增长而提高,进一步提高存水率,扩大水淹体积。

## 5 结论

(1) 经实例验证笔者建立的稳产条件计算式是正确和实用的。

(2) 井网加密调整是实现油田稳产的主要技术措施。根据23个油田资料建立的单井控制储量的倒数与可采储量增长率模型,可用于井网加密调整的论证和规划预测。

(3) 对于中、高渗透油藏,井网加密最好的调整时机是开发方案设计的稳产期限时刻。低渗透油藏应在开发初期取得再认识后进行井网加密调整。

(4) 控制含水率上升速度、保持产液量稳定上升的注水原则是:总注水量随产液量增长和地层压力要求而提高的同时,应采取注水层段细分、封隔器双卡为重点的分层注水系列调整措施。

### 参 考 文 献

- [1] 袁庆峰. 认识油田开发规律科学合理开发油田[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 65-66.  
Yuan Qingfeng. Understanding oilfield development rule, scientifically and reasonably developing oilfields [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5): 65-66.
- [2] 田晓东, 王凤兰, 石成方, 等. 大庆喇萨杏油田产量递减率变化规律[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊): 137-141.  
Tian Xiaodong, Wang Fenglan, Shi Chengfang, et al. Variation law of production decline rate in Lasaxing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Supplement): 137-141.
- [3] 胡建国, 任玉林, 凡哲元, 等. 油田老井月度自然产量的预测方法[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 109-111.  
Hu Jianguo, Ren Yulin, Fan Zheyuan, et al. Forecasting method for monthly natural oil production of old wells in oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 109-111.
- [4] 王德喜, 张建军, 高志刚, 等. 喇嘛甸油田特高含水期厚油层挖潜工艺[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 98-100, 106.  
Wang Dexi, Zhang Jianjun, Gao Zhigang, et al. Potential excavation technology for thick formations of extra-high water cut period in Lamadian Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 98-100, 106.
- [5] 周英杰. 埕岛油田提高水驱采收率对策研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 466-468.  
Zhou Yingjie. Measures to improve water drive recovery efficiency of offshore Chengdao Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 466-468.
- [6] 石成方, 齐春艳, 杜庆龙. 高含水后期多层砂岩油田单砂体注采关系完善程度评价[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊): 133-136.  
Shi Chengfang, Qi Chunyan, Du Qinglong. Evaluation on injection-production relationship of single sandbody in multiple-layer sandstone oilfields in later high water cut stage [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Supplement): 133-136.
- [7] 韩德金, 张凤莲, 周锡生, 等. 大庆外围低渗透油藏注水开发调整技术研究[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 83-86, 91.  
Han Dejin, Zhang Fenglian, Zhou Xisheng, et al. Study on adjustment technology of waterflood development of low-permeability reservoirs in the periphery of Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 83-86, 91.
- [8] 李阳. 我国油藏开发地质研究进展[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 75-79.  
Li Yang. Progress of research on reservoir development geology in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 75-79.
- [9] 王家宏, 萨尔图, 喇嘛甸油田分层注水强度分布规律研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1998, 17(2): 19-21.  
Wang Jiahong. Research on distribution rules of separate layer injection intensity in Saertu and Lamadian Oil Fields [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1998, 17(2): 19-21.

(收稿日期 2008-04-14 改回日期 2008-09-04 编辑 黄小娟)