

# 影响水平井产量的主要因素 与提高产量的途径

窦宏恩 刘翔鹤

(石油勘探开发科学研究院)

**摘要** 系统分析了水平井井眼尺寸、井眼轨迹、水平井水平段长度和偏心距对水平井产量造成的影响。进一步研究了油藏的非均质性,不同驱动方式下水平井的位置,钻井液造成的地层伤害,几种不同的完井工艺和增产措施对水平井产量的影响。导出了水平井段最大长度计算公式,给出上述影响因素下在水平井生产中的可控制参数的合理选择,并提出了提高水平井产量的途径。

**主题词** 影响 水平井 油井产量 条件 增产 可行性研究

**作者简介** 窦宏恩,1962年生。获工学硕士学位,现攻读博士学位,工程师。刘翔鹤,1936年生。现任院总工程师,教授级高级工程师,本刊编委。

近年来,在国内外石油工程领域,水平井井数不断增加,但部分水平井的产量很低,经济效益不好,生产效果不尽如人意。如何提高和发展水平井技术,以期达到以较少的资金投入、获得最佳的油井产量、提高采收率的目的。本文试图就影响水平井产量的几个主要因素进行分析,并提出水平井提高产量的途径,为水平井的研究提供借鉴。

## 一、几何因素分析

水平井井眼尺寸、水平段长度、井眼轨迹、水平井相对油藏的偏心距等几何因素都对水平井产量产生影响。

1. 井眼尺寸 根据地质特征、油藏条件确定一个合理的井眼尺寸,对钻井过程而言,有利于井眼稳定,钻机的合理选型,节约能源;对采油工程来说,有利于实施各种工艺过程的供排协调。根据油藏特点提出如下二个原则:

(1)低渗透油层、薄油层、浅油层钻小井眼,  $\varnothing 100\text{mm}$  或  $\varnothing 125\text{mm}$  套管完井。既利于钻井,又利于采油,其原因是我国油田多数都属中、高含蜡。如果采用大井眼完井,原油在地层中渗流速度低,在开采中势必造成较低的流速,油井结蜡严重,而最终导致产量降低。

(2)高渗透油层、高压油层钻大井眼,  $\varnothing 139.7\text{mm}$  到  $\varnothing 177.8\text{mm}$  套管作为钻井完井套管是合理的。以达到油井产量与流出动态相协调,获得满意的油井产量。

2. 水平井井眼轨迹 水平井三种井眼轨迹(三种基本剖面)长半径剖面、中长半径剖面和混合剖面<sup>[1]</sup>。不同的水平井轨迹曲线受造斜率、造斜角、不同的曲线类型影响。井眼轨迹不只对钻井工程产生影响,对采油工程产生的影响同样不能忽视。

钻井工程中井眼轨迹的合理与否,给制订采油工程方案带来影响,且直接影响油井产量,

井眼轨迹的不规则给钻井、固井和完井均带来不利。对采油作业者来说,弯曲的轨迹(剖面)可能使抽油泵装置的组件发生变形,泵的工作复杂化,甚至无法下泵生产,或泵下入井筒时,受井眼轨迹的限制。对于各种泵而言,泵的轴线偏离垂直线角度的增加,对球阀式泵(有杆阀球式抽油泵、水力活塞泵)可使球阀的工件条件变坏,泵效降低,或经常发生事故使生产无法进行。常用的井眼轨迹推荐使用,直段+第一造斜井段+斜直井段+第二造斜井段+水平井段<sup>[2]</sup>。

3. 水平井水平段长度的选择 国内外学者都曾发表文章<sup>[3~5]</sup>定性说明水平段长度是影响产量的主要因素之一,文献[6]通过电模试验认为水平井段长度是供油半径的0.66~0.76倍,但这个试验值偏保守。都未给出水平井水平段长度的计算公式。

在水平井渗流场中,学者们普遍接受的渗流场是椭圆泄流。根据椭圆性质有

$$a^2 + b^2 = (L/Z)^2 \tag{1}$$

式中  $a$  ——椭圆长半轴,m;  $b$  ——椭圆短半轴,m;  
 $L$  ——水平井段长度,m。

根据椭圆域与圆域的面积等效原则有  $\pi ab = \pi R_c^2$  (2)

式中  $R_c$  ——供油半径,m。

由(1)、(2)式得

$$2 \sqrt{2} \sqrt{R_c^2 - b^2} \leq L \leq 2 \sqrt{2} \sqrt{a^2 - R_c^2} \tag{3}$$

因此  $L_{\max} = 2 \sqrt{2} R_c$  (4)

根据椭圆域泄油,水平段长度受供油半径和椭圆域半长轴和半短轴尺寸的影响,其中  $b < R_c < a$  之间。文献[7]给出的供油半径  $R_c = 300\text{m}$ ,而水平段长度  $L = 5\ 000\text{m}$ ,这是不符合实际情况的,根据(4)式可知,其水平段最大长度  $L_{\max} = 848.4\text{m}$ ,也绝对不会出现  $5\ 000\text{m}$  水平段长度。

笔者认为水平井段的范围值应在  $R_c \leq L \leq 2 \sqrt{2} R_c$  之间选取较为合理。

不合理的水平井段长度不仅增加了钻井工程难度,也使水平井采油效果变差<sup>[8]</sup>。

4. 水平井相对油层厚度中心的偏心距对产能的影响 根据文献[9]可推导出水平井在油层任意位置的产量公式

$$Q_{hp} = \frac{5.4259 \times 10^2 K h}{\mu_o B} \left\{ \frac{\Delta P}{\frac{\pi R_c}{L} + \frac{h}{L} \ln \left[ \frac{h}{2\pi r_w} \cos \frac{\pi \delta}{h} \right]} \right\} \tag{5}$$

式中  $Q_{hp}$  ——偏心水平井产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $h$  ——油层厚度,m;  
 $K$  ——有效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\Delta P$  ——生产压差,MPa;  
 $K = \sqrt{K_h \cdot K_v}$   $\mu_o$  ——地下原油粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  
 $K_h$  ——水平渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $B$  ——原油体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $K_v$  ——垂直渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\delta$  ——相对油层中心的偏心距,m。

从(5)式可看出,偏心距越小,水平井产量越低。但经实例计算发现,在其它油藏参数不变

的情况下,有偏心的水平井与无偏心的水平井产量相差不大。因此推荐水平井水平段通常打在油层中间位置易于施工。

## 二、不同油藏类型的水平井

1. 低渗油藏、薄油层水平井 低渗透油藏和薄层油藏,以减少在同区块打更多的直井而节约成本。但在国内外都出现了在低渗层中打水平井后效果甚差被迫关井的事例。对于低渗油藏和薄油层的水平井(包括直井)达不到预期的效果,笔者认为,一些地层虽然有油,但由于地层致密,渗流条件差;或由于地层原始压力低,不能进行正常的工业性开采。因此,应从系统开发角度出发,首先配套注采井网,靠注水提高地层压力方可取得好的开采效果,对于注水困难的区块,先实施酸化、压裂强化措施工艺,方可在水平井或直井联合开采的区块获得较理想的产量。

2. 水平井在油藏中的位置(气顶与底水) 水平井在油藏中打在什么位置,对产量同样产生直接影响。在具有气顶或含水层的油层中,所钻水平井井段的位置要求远离气/油界面或油/水界面,以增加其油/水界面或油/气界面距离,并使水、气锥进减到最低程度。在多数实际情况下,水平井段通常位于油柱剖面下部1/3处,其目的是延迟见气时间,因为气体突入井中会造成油藏快速的压力衰竭<sup>[10]</sup>。

文献[11]提出在底水油藏中,将水平井设置在油水界面之下,可获得更高的原油采收率。打在水层中的井可采出迅速下锥到水层的原油,称其为“反锥”或“反脊”,这种工艺已在 Troll 油田获得较好的效果,在我国水平井开采的底水油藏方案设计中可考虑使用(见图1)。

3. 水平井井网 水平井的井网布置同样是影响水平井产量的一个不可忽视的因素,水平井井网如果要获得高的驱替面积,理想的布井应该是有一个水平注入井和一个水平生产井,并且是平行排列的(见图2)。当水平井注入与垂直生产井配对时,平面波及效率在0~90%之间,主要取决于水平井的长度与布井方向。通常,当水平注入井指向垂直生产井的方向时,平面波及系数比2口垂直井基准情况低,当水平段越长,这种情况就越糟,当水平井的布井方向与流动方向垂直时,平面波及效率随着井的长度增加而提高,达到90%以上。水平注入井和生产井可把平面波及效率提高到几乎100%<sup>[12]</sup>。

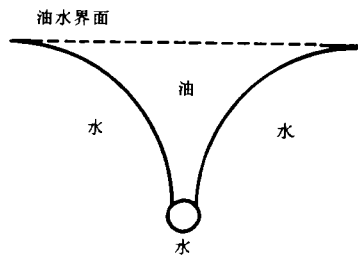


图1 底水油藏水平井布井示意图

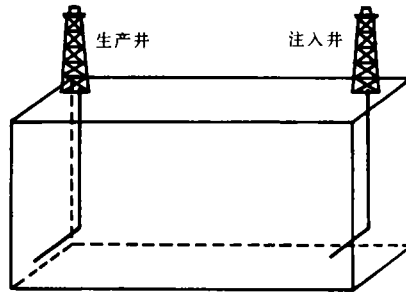


图2 水平井网理想布井示意图

## 三、钻井液与完井

1. 钻井液 为防止钻井液漏失到油层,堵塞或污染产层,钻井液密度应高于地层压力和井眼稳定的要求,而低于破裂压力对钻井液密度的要求。

不同的钻井泥浆系统对油藏造成的伤害均不相同。钻井实践证明,油基泥浆相对聚合物泥浆、阳离子泥浆对油层的伤害程度最低。因此,在水平井钻开油层时,油基泥浆是最佳的选择。塔中四油田水平1井用油基泥浆打开油层,而水平3井则用水基泥浆打开油层,最终2口井在其它地层条件基本一致的情况下,水平1井产量为1175t/d,比水平3井产量高119t/d。

2. 水平井完井 水平井完井技术选择是否合理,同样是影响水平井产量的因素。

(1)裸眼完井。裸眼完井方法不能封堵气侵与水侵,并对部分井段无法进行选择性的增产措施。在大压差下,出砂严重,更甚者砂塞油层。通常在致密坚实的岩石环境下可考虑采用。

(2)割缝衬管完井。在水平井中使用割缝衬管防止井壁坍塌,另外衬管可以为在水平井坐入各种井下工具提供方便,诸如,下绕性油管对油层实施措施,割缝衬管对选择孔的大小和割缝宽度,对出砂都可进行有限的控制,推荐使用。但这种完井方法衬管易堵,实施措施困难。

(3)部分割开的衬管完井。该方法已在割缝衬管外安装了外部套管封隔器,把长的水平井眼分成几段,可沿井的长度方向上实施措施。一般在弯曲井眼中,有时坐入带几个外套管封隔器的衬管比较困难,因此分层段进行工艺措施受到限制。其完井工艺较前一种复杂。但在有可靠的完井封隔器的前提下,推荐使用。

(4)注水泥射孔完井。对于中、长半径水平井可以注水泥射孔,可完全控制流体注入,可确定流体流向,可封隔实施措施及测试各射孔段。采用封堵剂和挤水泥等操作较前3种完井方法易控制,但射孔过程中必须减小射孔污染油层。推荐使用这种完井工艺。我国塔中四油田水平3井进行了成功的射孔完井。

#### 四、强化增产

在水平井采油过程中,一些低渗透薄油层钻水平井后,产量较低的井中进行酸化或压裂,在施工过程中也出现了失败的事例,一是酸浓度过量严重伤害产层,二是压后井壁坍塌而导致油井产量降低。因此,目前在国外发展起来的定向压裂和现场实时监测酸化技术已成功应用于水平井<sup>[13]</sup>;在我国进一步推广盘管技术,广泛用于水平井操作,成功地解决水平井地层参数测试、分层酸化和压裂等工艺。

#### 五、结论与建议

1. 在水平井方案制订时,应取缔多部门细而杂、杂而乱的方案制订程序,在制订方案时吸取国外的先进经验,把地质师、油藏工程师、钻井工程师、采油工程师等组织起来,组成多学科工作队,制订一个完善、配套、可行性和操作性强的技术方案,确保水平井技术的稳步发展。

2. 把水平井技术方案在实施过程中作为技术上的一种“法规”来执行,不经技术负责部门批准,任何个人不能随意改动技术方案,或随心所欲按经验粗放办事,提高技术的精细管理程度,最终保证水平井获得较高的产量。

#### 参 考 文 献

- 1 Chevron Company. Horizontal Drilling and Completion Seminar. Volume 1, 1992
- 2 张祖兴主编. 国外水平井技术. 中国石油天然气总公司情报所, 1992-07
- 3 S D Joshi. Augmentation of Well Productivity With Slant and Horizontal Well. SPE 15 357

(下转第104页)

3. 与酸化结合综合处理油层法 把高能气体压裂与酸化结合起来综合处理地层是行之有效的办法。该方法可分为两种,一种是高能气体压裂作为酸化的预处理,即先进行高能气体压裂,压开地层形成裂缝,然后再进行酸化,使酸液更充分地进入地层裂缝,明显比单一的酸化效果好。另一种是直接利用酸液作为压裂液,在高能气体压裂的同时,将部分酸液挤入地层,有效地疏通裂缝。而且,井筒中酸液的上下运动,可洗刷井壁及孔眼上的粘结物,有效地清除堵塞。如辽河油田安15—17井,压裂前产油量为5.0t/d;进行高能气体压裂后,又接着进行酸化,产油量增至41.6t/d,有效期达1年。

4. 与稠油增产剂及水力压裂等措施结合综合处理油层 该方法与上述工艺方法基本相同,都能达到更有效地处理油层,提高稠油井产量的目的。

### 三、应用情况

高能气体压裂技术在稠油井的使用方法,经河南、辽河、胜利、冀东等油田的应用,取得了明显的效果,总有效率80%左右,最大施工井深3000多米。尤其是延时装药结构在稠油井的应用,因其施工简便、作业时间短、费用低,深受现场欢迎。与酸化、稠油增产剂等措施结合综合处理油层的方法在现场也得到了应用,取得了显著的经济效益。这些方法经不断深入研究和应用,日臻完善,为稠油井的开发和增产提供了有效的手段。

### 参 考 文 献

- 1 秦发动,王安仕,吴晋军等. 活塞自击式逐级延时引爆气体发生器装置设计及应用. 西安石油学院学报, 1995,10(3)
- 2 吴晋军,王安仕. 多用途分体组式撞击引爆装置的研究与应用. 西安石油学院学报,1996,11(4)
- 3 中国力学学会工程爆破专业委员会编. 爆破员读本. 北京:冶金工业出版社,1992

(修改稿收到日期 1996-09-26)

[编辑 王霜梅]

(上接第71页)

- 4 程林松等. 边水距油藏水平井开采的油藏工程研究. 石油勘探与开发,1993,20(增)
- 5 范子菲等. 一排水平井开采的油藏工程研究. 石油勘探与开发,1993,20(增)
- 6 曲德斌等. 水平井开发基础理论——物理模型研究. 石油学报,1994,15(4):49~56
- 7 徐景达. 关于水平井的产能计算——论乔希公式的应用. 石油钻采工艺,1991,12(6):67~74
- 8 M M Chang, et al. Predicting Horizontal/Slanted Well Production by Mathematical Modeling. SPE 18 854
- 9 窦宏恩. 预测水平井产能的一种新方法. 石油钻采工艺,1996,18(1):76~81
- 10 C P Peng. 水平井的油藏工程研究——水平井存在气锥或水锥问题的油藏中的应用. 第五次国际石油工程会议论文集(上册). 北京:国际文化出版公司,1995-10:655~667
- 11 B T Haug, et al. Horizontal Wells in the Water Zone: The Most Effective Way of Tapping Oil from Thin Oil Zones. SPE 22 929
- 12 R M Butler 著,韩群业译. 水平井在石油生产中的应用(续). 采油工艺情报,1993,(4):21~22
- 13 A D Hill, et al. 包含转向剂作用的基质酸化的实时监测. 第五次国际石油工程会议论文集(下册). 北京:国际文化出版公司,1995-10:635~347

(收稿日期 1996-04-08)

[编辑 王霜梅]

calculated in oil production with compensatory pump and conventional pump, using transient flow of elastic liquid through porous media and mathematical models of formation energy conversion. It is showed that the maximum radius of pressure drop funnel of compensatory pump is obviously smaller than that of conventional pump in same gross liquid production, i. e. , the longer stable production period will be obtained and the gross liquid production will be increased in production with compensatory pump.

**Subject heading** elastic drive oil reservoir energy conversion equilibrium stimulation oil producing compensator equation

#### INFLUENCE OF STEAM INJECTION PARAMETERS ON WELL — BORE TEMPERATURE

by Xu Yubing, Cui Xiaobing

**Abstract** Applying the temperature field computation program ISTAP for steam injection wells introduced in No. 1 literature, the wellbore temperature and steam parameters are calculated in different steam injection technological parameters. The effect of steam injection tubing depth is considered in computation of wellbore temperature field. It is concluded that increasing steam injection rate and reducing steam injection time is a effective method for shortening wellbore temperature increase process and decreasing steam breakdown in available technology conditions.

**Subject heading** steam injection well steam injection process parameter borehole temperature change

#### RESEARCH ON NODE ANALYTICAL METHOD IN STEAM INJECTION PROCESS

by Hou Jian, Chen Yueming

**Abstract** The pressure drop and heat loss in steam injection pipeline has a harmonious relationship with reservoir absorption capability in steam injection process. A model of injection parameters node analysis is presented, which taking surface pipeline, wellbore and formation as a whole. Based on the comprehensive model of two—phase flow and heat transmission, it can make the node analysis on injection parameters in combination with the absorption capability of formation. The results tallies with that in SPE literature, thus the validity of this model is verified.

**Subject heading** steam injection node analysis thermal calculation mathematical model

#### MAIN FACTORS EFFECTING OIL PRODUCTION AND WAYS ENHANCING OIL PRODUCTION IN HORIZONTAL WELL

by Dou Hong'en, Liu Xiang'e

**Abstract** This paper studies systematically the effects of wellbore diameter, wellbore trace, horizontal section length and eccentricity on production of horizontal well. The further research on the effects of heterogeneity of oil reservoir, position of horizontal well for different drive manner, formation damage caused by drilling fluid, different well completion technologies and stimulation on production of horizontal well. This paper also derives the calculating equation of maximum length of horizontal section, presents the reasonable selection of controllable parameters, and points out the ways enhancing oil production of horizontal well.

**Subject heading** influence horizontal well well production rate condition increase

### TESTING AND STUDYING ON RHEOLOGY OF POLYMER SOLUTION

by Li Fujun, Cao Guangsheng, Wang Dexi, Xia Huifen

**Abstract** The polymer solution was verified based on the analysis of testing data of rheology of polymer solution, whose molecular weight is 17 millions, which has pseudo-plastic rheological behavior of power-law fluid when the injection rate of individual well is smaller than 500 m<sup>3</sup>/d. The effect of concentration was analyzed on the rheological behavior of polymer solution. The variable laws of apparent viscosity, fluid index  $n$ , and consistency coefficient  $k$  was described with concentration of polymer solution.

**Subject heading** polymer solution power-law fluid rheological moded rheology apparent viscosity flow property

### DISCUSSION ON THE CALCULATION METHOD OF SYSTEM EFFICIENCY OF WATER FLOODING

by Ma Qingkun, Liu Qianjin

**Abstract** The system efficiency of water injection well is calculated by multiplying the efficiencies of every unit. The main problem in this method is that some data are difficult to collect and the calculation is complicated. A simple and suitable method was presented based on the analysis of energy variation of water injection system. It is applied to analysis the efficiencies of whole system or each unit. It is helpful to know energy consumption and make system reformation.

**Subject heading** water flooding system efficiency analytical method calculation method

### TESTING AND STUDYING ON SEALING AND COMPRESSIVE PERFORMANCE OF MAGNETIC VISCOELASTIC BODY

by Zhou Kaixue, Chen Chang, en, Lu Guiwu

**Abstract** A study was made on the formula of magnetic viscoelastic body and its seal and compressive strength under magnetic field. The relations were studied among seal and compressive strength, magnetic powder content, strength and distribution form of magnetic field. A new formula was presented to be used for magnetic sealing. It has advantages of acid-resistance, alkali-resistance, insolubility with oil and water and good thermal stability etc., and is suitable for magnetic seal in water/oil wells or other professions.

**Subject heading** magnetic property viscoelastic media formulation sealing compressive strength pack testing application

### STUDY AND APPLICATION OF PHENOLIC-RESIN COATING-SAND EXTERNAL CURING AGENT

by Zeng Qingkun, Jin Qianhuan, Wang Qiaoling

**Abstract** The J-01 type external curing agent, which can make phenolic-resin solidification in 45°C with high curing strength, is introduced in this paper. In the sand control operation using resin coating sand, it can meet the need of sand-control in low-temperature and high production-strength wells. There is important significance for the sand control in later production.

**Subject heading** sand control phenolic resin coating solidification strength temperature