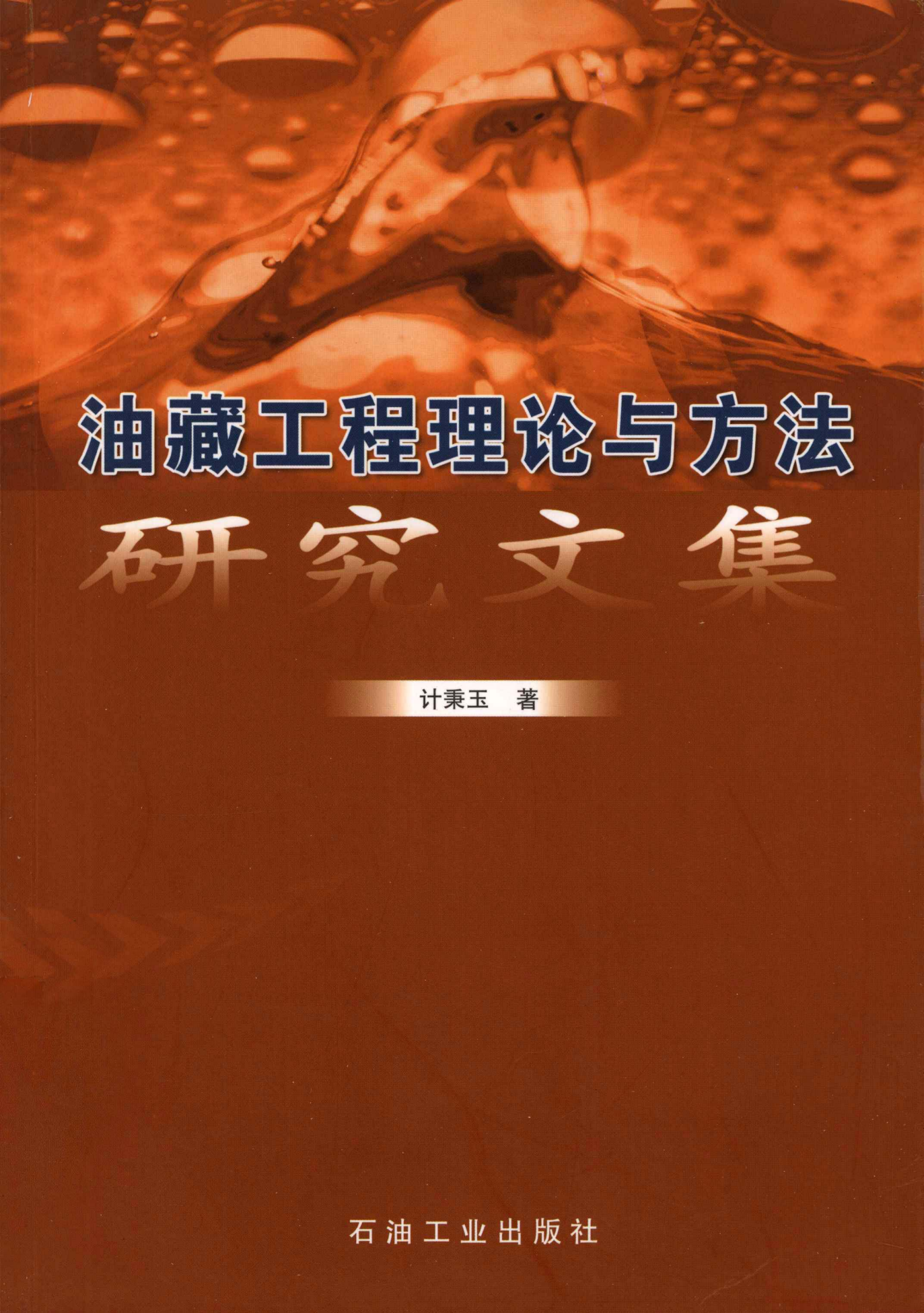




油藏工程理论与方法 研究文集

计秉玉 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者在全国或国际学术性会议与期刊上发表论文的汇编,是针对大庆油田近年来油田开发迫切需要进行攻关所得到的理论成果,突出学术性、创新性和实用性。在高含水期油田开发方面,涉及了注采结构调整理论、周期注水机理、动态法计算地质储量和分层含水预测等内容;在低渗透油田开发方面,涉及了渗吸法采油机理、基于渗透率张量特性的井网优化等内容;此外还涉及了油藏数值模拟、运筹学方法在油田开发中的应用以及三次采油等方面内容。

本书可供油田开发技术人员阅读,也可供油田应用数学工作者和石油大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油藏工程理论与方法研究文集/计秉玉著.

北京:石油工业出版社,2004.12

ISBN 7-5021-4892-2

I. 油…

II. 计…

III. 油田开发-文集

IV. TE34-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 127367 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂印刷

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.25

字数:256 千字 印数:1—2000 册

定价:28.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

经过 44 年的开发,大庆油田形成了具有国际水平的大型多层非均质砂岩油田的注水开发技术和聚合物驱油技术,造就了一批国内外知名专家学者,实现了 5000 万吨以上连续 27 年的高产稳产,创造了世界油田开发史上的奇迹,铸就了中国石油工业的辉煌,为共和国的建设与发展做出了令人瞩目的贡献。

怀着对石油工业的美好憧憬,本人 1983 年来到大庆油田工作,从此踏上了石油科学研究的征程。在老一辈石油专家的培养和教导下,我始终坚持以解决油田开发实际问题为驱动力,致力于油藏工程理论方法和应用技术研究。在高含水期油田开发和低渗透油田开发等几个方面取得了一些研究成果,其中大部分已在全国性刊物或学术会议上发表。本论文集包含论文 30 篇,归纳为高含水期油田开发、低渗透油田开发与三次采油、油藏数值模拟与系统工程方法的应用三个部分,体现了本人 20 年来在油藏工程研究方面的主要研究成果。这本论文集的出版,既是本人从事油田开发技术研究工作的一个阶段小结,同时也提供了与专家同行进行学术交流,继续提高自己研究水平的机会。

在本书编辑和出版的过程中,《大庆石油地质与开发》编辑部主任陆会民、副主编何先华等同志付出了辛勤劳动和心血,对此表示衷心的感谢!同时对大庆油田勘探开发研究院的同仁们多年来给予的大力支持与合作深表谢意!由于时间仓促和能力有限,文集中还有许多地方有待于进一步研究。希望本文集起到抛砖引玉的作用,期待着同仁们对文中存在的问题批评指正,并予以发展和完善。

作 者

2004 年 9 月

目 录

高含水期油田开发

垂向非均质油层周期注水力学机理研究.....	1
影响周期注水提高采收率效果的因素分析.....	7
油水两相径向稳定渗流条件下压力分布及产量变化特征	13
产量递减方程的渗流理论基础	16
井底脱气条件下产量的变化规律	21
喇萨杏油田高含水后期油井流压界限变化趋势	25
关于注采比与油井地层压力的几点研究	30
油层注采结构调整后开发指标变化数学模型研究	34
大庆喇萨杏油田分类井动用地质储量计算及产量分配优化数学模型研究	40
分层含水率预测模型研究	45

低渗透油田开发与三次采油

应用地层测试器测试资料计算采油指数	56
油井见效时间和见水时间计算公式	58
裂缝性低渗透油层渗吸作用的数学模型	62
模糊数学与数理统计方法在大庆朝阳沟油田开发中的应用	68
大庆油田勘探开发一体化“百井工程”模式的理论与实践	77
关于不同类型储层驱替速度对采收率影响的理论探讨	83
Permeability Tensor Characteristics of Anisotropic Reservoir and Optimization of Well Pattern Parameters	88
对大庆油田进一步开展三次采油技术研究的几点看法	94
关于聚合物驱几个问题的研究	98

油藏数值模拟与系统工程方法的应用

油藏模拟网格方向设计及主渗透率初值确定方法.....	106
改变液流方向的数值模拟计算.....	110
正交设计在油藏数值模拟中的应用.....	112

关于大庆油田油藏数值模拟技术中若干问题的看法..... 115

油藏管理工程——一门亟待建立和发展的学科..... 119

油田开发指标预测方法综述..... 123

运筹学方法在大庆油田开发中的应用..... 128

优化方法在油田开发决策中应用综述..... 134

Game theory 与 DEA 方法在油田开发多目标决策中的应用研究 140

油区开发总体决策特征分析..... 145

Method for Predicting Oil Field Development Index Based on Genetic Algorithm 151

垂向非均质油层周期注水 力学机理研究^{*}

摘 要 由油水两相达西定律,推导出垂向非均质油层在周期注水作用下油水纵向窜流由重力窜流、毛管力窜流和附加窜流三部分组成的解析表达式。以 J 函数为基础,分析了毛管力纵向窜流特性及其对开发效果的影响,阐明了周期注水与稳定注水的本质差别,得出垂向非均质油层周期注水改善开发效果的力学机理。

前苏联学者 M. И. 苏尔古切夫于 20 世纪 50 年代末第一次提出周期注水概念,认为利用现有的注水设备周期性地改变注水方式,在油层中人为地建立不稳定压力状态可以强化采油过程。根据这个结论,自 1964 年开始,前苏联曾先后在波克罗夫等 50 余个油田进行周期注水矿场试验或工业性开采,均取得较好的开发效果。矿场经验表明,周期注水与常规(稳定)注水相比可提高采收率 3%~10%。

从 1965 年开始,前苏联开始注重周期注水理论研究。其中以前全苏石油科学院 O. Э. 岑科娃等人 20 世纪 70 年代建立的数学模型最有影响。问题是该模型只是在引进水滞留系数概念的基础上(即假定周期注水有效果情况下)通过估算垂向非均质油层内高低渗透率层段间的交渗流量来预测周期注水改善开发效果的大小及其影响因素^[1],不能从本质上阐明周期注水作用的力学机理。

B. Г. 奥甘贾尼扬茨等人通过室内实验认为周期注水改善开发效果的物理实质是在停注阶段充分发挥了毛管力窜流作用,结果使低渗透小层中驱出更多的原油和高渗透水淹层含水饱和度明显减少。并由此推论出水湿油层更适合于周期注水的结论。

作者运用数值模拟计算表明,油湿油层周期注水同样能取得较好的效果。为了更加有效地指导我国油田周期注水开发,本文以渗流力学分析为基础探讨周期注水作用机理。

一、周期注水情况下油水纵向窜流形式

1. 使垂向非均质油层高低渗透率层段间产生附加压力差

渗流力学分析与数值模拟计算表明,在稳定注水情况下,由油水密度差产生的重力作用和油水两相间毛管力作用使油水在纵向上运动并产生垂向平衡,如不考虑位势差,油层纵向上高低渗透层段间各相压力趋于相等。而周期注水却打破了这种平衡。表现在,在周期注水的停注或减少注水量半个周期内,注采不平衡导致地层压力下降,由于含油饱和度(影响综

^{*} 本文发表于《石油学报》1993 年第 14 卷第 2 期。

合弹性压缩系数的重要因素)和渗透率差异,使高渗透层段压力下降快,低渗透层段压力下降慢。这种下降速度的不同步导致了同一时刻内高渗透层段压力较低,低渗透层段压力较高,从而在层段间产生除毛管力和重力势之外的一种压力差(对于这种不稳定注水所固有的压力差,我们称之为附加压力差)。相反,在重新注水或加大注水量半个周期内,高渗透层段压力恢复快,低渗透层段压力恢复慢,又产生反向压力差(图1)。

2. 层段间产生3种不同属性的纵向窜流

以垂直向下方向为 z 方向建立坐标系,假定油层中只存在油水两相,由达西定律可写出下列油水纵向运动方程

$$\begin{aligned} v_{zw} &= -\frac{K_z K_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \varphi_w}{\partial z} \\ &= -\frac{K_z K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial z} - \rho_w g \right) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{zo} &= -\frac{K_z K_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \varphi_o}{\partial z} \\ &= -\frac{K_z K_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial z} - \rho_o g \right) \quad (2) \end{aligned}$$

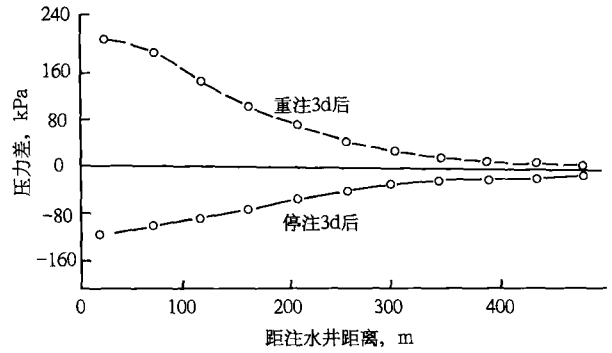


图1 高低渗透层段压力差分布图

由于周期注水在层段间产生附加压力差,所以有

$$v_{zi} = v_{zw} + v_{zo} \neq 0 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)联立,并令

$$\lambda_1 = \frac{K_z K_{rw}}{\mu_w}, \quad \lambda_2 = \frac{K_z K_{ro}}{\mu_o}, \quad p_c = p_o - p_w$$

得

$$v_{zw} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{\partial p_c}{\partial z} + (\rho_w - \rho_o) g \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} v_{zi} \quad (4)$$

令 $\frac{\partial p_{wa}}{\partial z}$ 表示由周期注水作用产生的附加压力梯度,则

$$v_{zi} = -(\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\partial p_{wa}}{\partial z} \quad (5)$$

则式(4)变为

$$v_{zw} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{\partial p_c}{\partial z} + (\rho_w - \rho_o) g \right] - \lambda_1 \frac{\partial p_{wa}}{\partial z} \quad (6)$$

令

$$v_{zww} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} (\rho_w - \rho_o) g \quad (7)$$

$$v_{zwc} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \frac{\partial p_c}{\partial z} \quad (8)$$

$$v_{zwa} = -\lambda_1 \frac{\partial p_{wa}}{\partial z} \quad (9)$$

则式 (6) 可写成

$$v_{zw} = v_{zwc} + v_{zww} + v_{zwb} \quad (10)$$

式 (6) 或式 (10) 表明, 周期注水作用下水在垂向非均质油层纵向上产生重力、毛管力和附加窜流 3 种形式的运动。

二、毛管力窜流特性及其对开发效果的影响

毛管力窜流是水驱油田开发过程中普遍存在的一种现象。为研究周期注水改善开发效果力学机理的需要, 对这一问题进行了比较深入的剖析。

由 J 函数表达式, 可将毛管力写成

$$p_c = \left(\frac{\varphi}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \sigma \cdot \cos\theta \cdot J(S_w) \quad (11)$$

再将毛管束模型中渗透率与孔隙半径关系

$$K = \frac{\varphi r_c^2}{8} \quad (12)$$

代入上式, 得

$$p_c = \frac{2\sqrt{2}}{r_c} \sigma \cdot \cos\theta \cdot J(S_w) = p_c(S_w, r_c, \cos\theta) \quad (13)$$

为考查毛管力在油层纵向上的变化, 将式 (13) 对 z 求偏导数, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_c}{\partial z} &= \frac{\partial p_c}{\partial S_w} \frac{\partial S_w}{\partial z} + \frac{\partial p_c}{\partial r_c} \frac{\partial r_c}{\partial z} + \frac{\partial p_c}{\partial \cos\theta} \cdot \frac{\partial \cos\theta}{\partial z} \\ &= \frac{\partial p_c}{\partial S_w} \frac{\partial S_w}{\partial z} - \frac{2\sqrt{2}\sigma \cos\theta J(S_w)}{r_c^2} \frac{\partial r_c}{\partial z} + \frac{2\sqrt{2}\sigma J(S_w)}{r_c} \frac{\partial \cos\theta}{\partial z} \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$v_{zwc1} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \frac{\partial p_c}{\partial S_w} \frac{\partial S_w}{\partial z} \quad (15)$$

$$v_{zwc2} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[-\frac{2\sqrt{2}\sigma \cos\theta J(S_w)}{r_c^2} \right] \frac{\partial r_c}{\partial z} \quad (16)$$

$$v_{zwc3} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{2\sqrt{2}\sigma J(S_w)}{r_c} \right] \frac{\partial \cos\theta}{\partial z} \quad (17)$$

则

$$v_{zwc} = v_{zwc1} + v_{zwc2} + v_{zwc3} \quad (18)$$

由上可见, 按成因可将毛管力引起水的纵向窜流分为 3 部分。

1. 含水饱和度差异引起水纵向毛管窜流

式 (15) 表明, 不考虑其他因素, 含水饱和度在油层纵向上分布的差异将会产生毛管力窜流。由毛压曲线形态 (图 2、图 3) 可知, 不论水湿油层, 还是油湿油层, 均有 $\frac{\partial p_c}{\partial S_w} < 0$,

即窜流速度 v_{zwc1} 与梯度 $\frac{\partial S_w}{\partial z}$ 方向相反, 说明水总是由高含水饱和度向低含水饱和度窜流。并且窜流量的大小与 $\frac{\partial S_w}{\partial z}$ 成正比, 即油层纵向小层段间饱和度差异越悬殊, 则窜流量越大。据上述分析可知, 饱和度差异产生的毛管力窜流对于各种地质条件油藏不同开发阶段均起到均匀水淹、减缓层段间矛盾的作用。

2. 孔隙半径变化引起水纵向毛管窜流

对于水湿油层, $\cos\theta > 0$, 据式 (16), 窜流速度 v_{zwc2} 与 $\frac{\partial r_c}{\partial z}$ 反向, 说明水由大孔隙高渗透层段窜向小孔隙低渗透层段; 相反, 对于油湿油层, $\cos\theta < 0$, 窜流速度 v_{zwc2} 与 $\frac{\partial r_c}{\partial z}$ 同向, 水则从小孔隙低渗透层段窜向大孔隙高渗透层段。这种由孔隙大小变化所产生的水窜流大小与 $\frac{\partial r_c}{\partial z}$, 即层段间孔隙大小差异成正比。

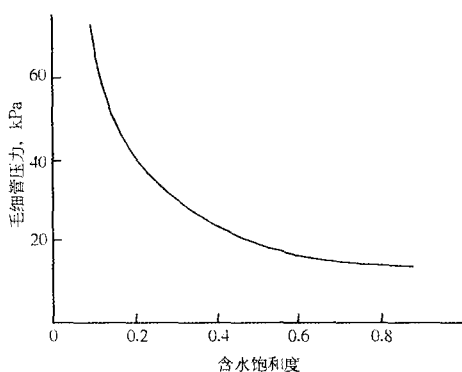


图2 水湿油层毛压曲线示意图

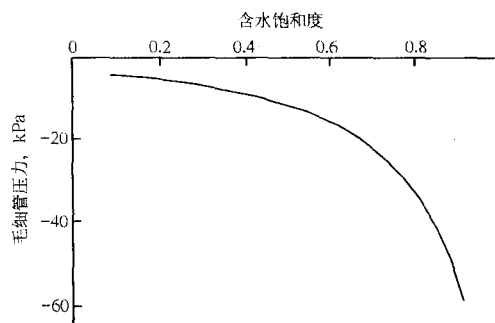


图3 油湿油层毛压曲线示意图

由于在开发过程中低渗透层段具有较高的剩余油饱和度, 高渗透层段具有较高的注入水饱和度, 因此, 上述分析表明, 孔隙半径差异产生的毛管力窜流对于水湿油层将起到均匀水淹作用, 有利于油田的开发, 而对油湿油层则刚好相反。这就是水湿油层为什么常常比油湿油层开发效果好的一个根本原因。

3. 润湿性变化引起水纵向毛管窜流

式 (17) 表明, 由润湿性强弱变化所产生的毛管力窜流速度 v_{zwc3} 与 $\frac{\partial \cos\theta}{\partial z}$ 同向, 说明水窜向强水湿方向。并且润湿性变化越大, 这种窜流越剧烈。

大庆油田运用自动吸入法测定油层润湿性资料统计表明^[2], 随着渗透率降低, 孔隙半径变小, 泥质含量增多, 束缚水饱和度增高, 油层水湿性增强。所以, 润湿性差异产生的毛管力窜流一般情况下使水从高渗透层段窜向低渗透层段, 是油田开发的有利因素。

三、周期注水改善开发效果的力学机制

1. 附加窜流对开发效果的影响

模拟计算和理论分析表明, 稳定注水情况下, 油层纵向油水总流速

$$v_{z1} = v_{zw} + v_{zo} = 0 \quad (19)$$

此时水在油层纵向上窜流速度可表达为

$$v_{zw} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{\partial p_c}{\partial z} + (\rho_w - \rho_o)g \right] \quad (20)$$

比较式(20)与式(4),可知重力窜流和毛管力窜流是周期注水和稳定注水所共有的窜流形式。只有附加压力差产生的附加窜流才是周期注水所特有的一种油水纵向运动形式。

这个附加窜流具有方向随着周期注水方式的改变而变化的特性。在停注或减少注水量半周期内,油水均从低渗透层段窜向高渗透层段,而在重新注水或加大注水量半周期内油水又均从高渗透层段窜向低渗透层段。只是由于高低渗透层段间含水饱和度的差异引起流度的变化,使在一个完整的周期内有更多的水从高含水的高渗透层段窜向低含水的低渗透层段,更多的油从低渗透层段窜向高渗透层段,从而改变了垂向非均质油层在稳定注水条件下由重力和毛管力垂向平衡所形成的油水垂向分布,使水淹更加均匀。

以上分析表明,周期注水产生的附加窜流能够起到调节油层内层段间矛盾的作用,是油田开发的有利因素。这就是矿场实践所证实的周期注水可用于各种类型油藏和不同开发阶段的根本原因。周期注水均匀高低渗透层段间水淹作用的数值模拟结果(一个周期)见图4。

周期注水过程是否能加强毛管力窜流作用?从以上分析可看出,在确定的地质条件下,注水开发过程中影响毛管力窜流强弱的基本因素是饱和度差异。而周期注水产生的附加窜流有减小层段间饱和度差异的作用。这说明周期注水将会削弱毛管力窜流。那种认为周期注水改善开发效果的主要机理是充分发挥毛管力作用的观点是不正确的。

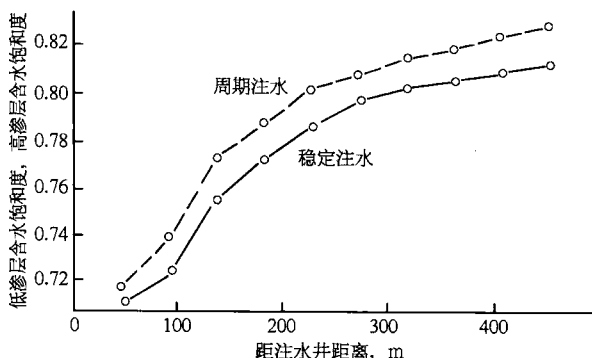


图4 高低渗透层段水淹程度对比图

2. 影响周期注水效果的根本因素

通过周期注水附加窜流作用机制

可以推论,影响周期注水改善开发效果大小的根本因素是层段间渗透率差异和饱和度差异。这种差异越大,层段间产生的附加压力差将越大,两个方向的流量差也越大,从而在一个周期内由高渗透层段渗入到低渗透层段的水量和低渗透层段渗入到高渗透层段中的油量也越多,即周期注水改善水驱效果越明显。换句话说,当层段间矛盾越突出时越适合于周期注水。

水湿油层毛管力在注水开发过程中起到均匀水淹作用,在一定程度上减缓了层段间饱和度差异,使周期注水附加窜流效果变差。例如,通过一个水湿正韵律模型的数值模拟计算发现,当考虑毛管力时,常规稳定水驱采收率(含水98%时的采出程度)为39.1%,而在相同累积注水量下的周期注水采收率上升到43.1%,提高了4个百分点。而不考虑毛管力影响时,常规稳定水驱采收率为30.5%,周期注水采收率上升到36.7%,提高了6.2个百分点,比存在毛管力情况效果更加明显。

总之,大量的数值模拟计算表明,常规稳定水驱不利的因素留下了剩余油潜力,一般有利于周期注水改善开发相对效果的提高。例如,笔者运用正交设计法,以提高采收率的数值

作为指标,通过数值模拟发现,正韵律油层周期注水效果比反韵律油层明显;油湿油层周期注水效果比水湿油层明显;非均质性越强,原油粘度越大,周期注水效果越显著。

值得注意的是,本文关于周期注水改善开发效果力学机理是在油层压力高于饱和压力,即只存在油水两相运动条件下得到的。对于高饱和压力油田,如果停注阶段地层压力过低将会形成溶解气驱动,原油性质遭到破坏,周期注水效果将会大幅度变差。

四、结 论

以渗流力学解析公式为基础并结合油藏数值模拟计算,比较深入地研究了垂向非均质油层周期注水作用力学机理。所得结论是,通过周期注水可以在垂向非均质油层高低渗透层段间造成附加压力差,产生附加窜流。这个附加窜流能起到均匀油层纵向水淹的作用,有利于开发效果的改善。并且稳定注水条件下层段间矛盾越突出,周期注水效果越明显。

毛管力窜流是稳定注水与周期注水所共有的一种窜流形式,决定其大小的主要因素是饱和度的差异、孔隙半径差异和润湿差异,并没有随着周期注水作用而加强的规律性。相反,周期注水均匀水淹作用将会削弱毛管力,而有利于水驱的毛管力存在也会降低周期注水增油作用。周期注水不仅仅适用于水湿油层,在油湿油层中也会取得好效果。

符号说明:

v_{zw} —— z 方向水流速; v_{zo} —— z 方向油流速; v_{zt} —— z 方向油水总流速; θ ——润湿角;
 r_w ——孔隙半径; φ_w ——水相的势; φ_o ——油相的势; p_c ——毛管压力; σ ——油水界面张力; $J(S_w)$ —— J 函数,为水饱和度函数。

参 考 文 献

- 1 И. Н. 沙尔巴托娃, М. Л. 苏尔古切夫. 王福松译. 层状非均质油层的周期注水开发. 北京: 石油工业出版社, 1989
- 2 刘丁曾著. 多油层砂岩油田开发. 北京: 石油工业出版社, 1986

影响周期注水提高采收率 效果的因素分析^{*}

摘 要 用正交试验法进行剖面模型数值模拟计算方案设计,研究了影响周期注水提高采收率有关地质工程因素,得到了有意义的结论,为进一步开展周期注水矿场试验或工业性开采提供依据。

自前苏联学者苏尔古切夫^[1]20世纪50年代末第一次提出周期注水概念以来,前苏联曾先后在波克罗夫、乌克兰多林纳等近50个油田上进行周期注水矿场试验或工业性开采。我国的江汉、玉门、扶余及大庆的太南、葡南等油田或区块,近年来也以周期注水作为开发方法或进行后期调整。实践表明,周期注水是一种适用于各类油藏和不同开发阶段的强化采油方法,具有投资小、见效快等优点,与常规注水相比可提高采收率3%~10%。

从1965年开始,前苏联利用数学模型、室内实验结合矿场试验研究周期注水理论。全苏石油科学院岑科娃等人20世纪70年代建立的周期注水模型,由高、低渗透层(二层模型)组成,主要是估算注水量或注水压力周期性变化条件下二层间交渗流量,在此基础上定义评价周期注水效果指标,并编制了称作“POTOPI”的计算机程序。通过计算认为:强非均质性、层段间连通程度好的油层更适合于周期注水,并且时机越早,注水强度越大,周期注水效果越好。

博克塞曼等人通过室内实验认为,周期注水改善开发效果的物理本质是在停注半周期内充分发挥了毛管力作用,从而使低渗透层段得到更加有效的开发,并由此推论水湿油层周期注水效果好。

我国江汉油田也曾人造砂岩模型上进行过周期注水实验,认为晚期周期注水效果比早期周期注水更加有效。

为指导砂岩油田今后的周期注水工作,作者以数值模拟技术为手段,对影响周期注水提高采收率效果的地质工程因素进行了研究。

一、数值模型设计

依据砂岩油田地质特点,在可能影响周期注水提高采收率效果诸因素中,本文选取了油层韵律、润湿性、渗透率非均质性、层段间垂向渗透率、原油粘度5个地质方面的因素和注水井流压、周期注水时期和周期长短3个工程方面的因素作为研究对象。其中韵律和润湿性分别选取3种具体情况,其他因素选取4种具体情况(表1)。只需比较这些因素的各种具体情况变化对周期注水提高采收率的影响程度,就可判断出哪些因素对周期注水提高采收率影响是显著的,以及哪些具体情况是有利的。

对各个因素的所有具体情况进行组合得到 $3^2 \times 4^6$ (36864)个模型,进行全面模拟对比显然是不现实的。所以,怎样从这些可能模型中选出少数具有代表性的进行模拟计算,并能

^{*} 本文发表于《大庆石油地质与开发》1993年第12卷第1期。

获得较全面的结论是研究问题的一个关键所在，本文运用正交试验法解决这个问题。

表 1 数值模型模拟因素水平

水 平	韵 律	润 湿 性	渗透率垂向分布 $10^{-3}\mu\text{m}^2$			垂向渗透率 (水平渗透率倍数)	原油粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	注水井流压 MPa	转周期 注水时期 a	周期长短 mon
1	正	水湿	300	300	300	0	7.78	20.0	0	0.5
2	反	油湿	5	100	1500	0.05	3.98	25.0	2	1.0
3	复	复合	20	150	1000	0.01	11.67	28.0	4	2.0
4			50	200	500	0.3	15.67	30.0	6	变周期 0.5 1 2

正交试验设计是根据所要考查和对比的因素（正交试验设计中称它们为“因子”）及每个因素可能所处的具体情况（正交试验设计中称它们为“水平”）出现的个数，选择合适的正交表 $L_m(n^k)$ 。其中， n 为水平个数， k 为因子个数的上限，由因子个数加上误差项数组成， m 为所需计算模型个数。正交表是一系列现成的表格，在有关正交试验设计书或数理统计用表中即可查到。

鉴于本文考查因素个数为 8，除韵律与润湿性的水平个数为 3 外，其他因素水平个数均为 4，笔者选择了正交表 $L_{32}(4^8)$ （表 2），并使用“拟水平法”处理水平数不等问题。“拟水平法”是对水平数较少的因素虚拟一些水平，使之能排在正交表多水平列上的一种方法（如表 2 头两列中的水平 4 用水平 1、2 虚拟）。在虚拟后的正交表 $L_{32}(4^8)$ 表头各列上填上各种因素后即完成了正交试验设计，表中每一行就确定了要进行模拟的具体数值模型。

表 2 剖面模型正交设计表 $L_{32}(4^8)$ （拟水平法）

模型号	韵律	润湿性	渗透率 垂向分布	垂 向 渗透率	原油粘度	误差项	注水井 流 压	转 周 期 注水时期	周 期 长 短
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	1 (4)	4	4	4	4	4	4	4
5	2	1	1	2	2	3	3	4	4
6	2	2	2	1	1	4	4	3	3
7	2	3	3	4	4	1	1	2	2
8	2	1 (4)	4	3	3	2	2	1	1
9	3	1	2	3	4	1	2	3	4
10	3	2	1	4	3	2	1	4	3
11	3	3	4	1	2	3	4	1	2
12	3	1 (4)	3	2	1	4	3	2	1
13	1 (4)	1	2	4	3	3	4	2	1
14	1 (4)	2	1	3	4	4	3	1	2
15	1 (4)	3	4	2	1	1	2	4	3
16	1 (4)	1 (4)	3	1	2	2	1	3	4
17	1	1	4	1	4	2	3	2	3
18	1	2	3	2	3	1	4	1	4
19	1	3	2	3	2	4	1	4	1
20	1	1 (4)	1	4	1	3	2	3	2

续表

模型号	韵律	润湿性	渗透率 垂向分布	垂 向 渗透率	原油粘度	误差项	注水井 流 压	转 周 期 注水时期	周 期 长 短
21	2	1	4	2	3	4	1	3	2
22	2	2	3	1	4	3	2	4	1
23	2	3	2	4	1	2	3	1	4
24	2	2 (4)	1	3	2	1	4	2	3
25	3	1	3	3	1	2	4	4	2
26	3	2	4	4	2	1	3	3	1
27	3	3	1	1	3	4	2	2	4
28	3	2 (4)	2	2	4	3	1	1	3
29	2 (4)	1	3	4	2	4	2	1	3
30	2 (4)	2	4	3	1	3	1	2	4
31	2 (4)	3	1	2	4	2	4	3	1
32	2 (4)	2 (4)	2	1	3	1	3	4	2

这样，本文运用正交试验设计法初步拟定了 32 套基础模型，其中每套模型又分常规注水（表 2 中后两列不考虑）和周期注水两种情况，以便计算出周期注水采收率增加的百分点数，作为周期注水提高采收率效果评价指标。

二、周期注水提高采收率影响因素分析

为更加全面地与常规注水采收率相比较，本文用下面两种方式给出周期注水采收率。第一种是与常规注水（含水 98% 时）同累积注水量下的采出程度，简称同累注量下的采收率。第二种是含水 98% 时对应的采出程度（由于周期注水方式下含水具有周期性变化特点，采出程度往往是含水的多值函数，本文选取最大、最小值的算术平均值），简称同含水下的采收率。32 套模型计算结果见表 3。

为克服各种计算误差的影响，本文运用建立在正交表基础上的方差分析方法处理模拟计算结果。其基本步骤是，首先计算各种因素与误差偏差平方和，除以各自自由度后得到标准偏差平方和。因子标准偏差平方和与误差标准偏差平方和之比值呈 F 分布，并且这个比值越大，说明该因子对周期注水提高采收率影响越重要，所以，可通过 F 检验定量地判断该因子的显著性。某一因子之某一水平的影响可用效应值来体现，效应值定义为某因子某水平平均值与总平均值之差，效应值越大，说明该水平对周期注水提高采收率越有利。计算方法细节可参见文献 [2] 和 [3]。

1. 同累积注水量下周期注水提高采收率影响因素分析

以相同累积注水量下周期注水采收率提高百分数作为指标，进行方差分析（表 4），可以得到如下结论：

（1）韵律对周期注水提高采收率影响显著，其中复合韵律最好，这是由于高低渗透层相间分布，在周期注水作用下容易发生交渗，使低渗透层潜力充分发挥出来。正韵律效果好于反韵律，这是由于受油水密度差引起的重力作用使上部低渗透层段在常规注水条件下得不到较好的水驱，从而使周期注水潜力增大。

（2）润湿性对周期注水提高采收率影响不显著。但从方差分析效应值还是可看出油湿油层周期注水效果好于水湿油层。这也是由于油湿油层在常规注水条件下得不到很好的开采，使周期注水提高采收率潜力变大。

（3）渗透率非均质性对周期注水提高采收率效果影响显著。非均质越严重，常规水驱采

收率越低，周期注水提高采收率潜力越大，效果越好。

表 3 模拟结果数据

模型号	常规注水 采收率 %	周期注水采收率,%		模型号	常规注水 采收率 %	周期注水采收率,%	
		同注水倍数 情 况 下	含水 98% 情 况 下			同注水倍数 情 况 下	含水 98% 情 况 下
1	55.5	55.9	55.8	17	41.8	41.7	45.3
2	37.5	37.5	41.7	18	35.6	38.7	37.3
3	44.0	44.3	42.7	19	45.1	44.7	44.1
4	41.5	42.2	42.1	20	46.5	46.9	46.7
5	59.6	59.9	59.9	21	51.0	51.8	51.8
6	28.2	28.2		22	29.4	30.0	34.5
7	43.8	45.2	40.9	23	42.2	43.7	39.0
8	51.8	53.7	53.3	24	51.9	52.2	52.3
9	33.4	37.0	38.8	25	42.9	44.0	45.4
10	44.0	44.3	44.4	26	48.5	48.9	49.4
11	52.0	53.1	52.8	27	47.9	48.5	48.2
12	42.9	45.9	46.6	28	29.9	35.9	34.9
13	38.5	40.1	41.1	29	63.4	64.5	65.6
14	41.4	42.1	42.6	30	42.2	43.8	43.6
15	52.7	53.5	53.7	31	51.3	52.4	54.6
16	44.7	45.7	53.0	32	26.1	26.1	33.2

表 4 周期注水提高采收率影响因素方差分析 (同累积注水量)

结 果		韵 律	润湿性	渗 透 率 垂向分布 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	垂 向 渗透率 (为水平渗 透率倍数)	原油粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	注水井 流 压 MPa	转 周 期 注水时期 α	周期长短 mon
$S_{\text{因}}$		73.8	26.1	107.4	126.5	48.5	25.7	75.6	12.4
$f_{\text{因}}$		2	2	3	3	3	3	3	3
$F_{\text{因}}$		8.2	2.9	7.9	9.3	3.6	1.9	5.6	0.9
显著性		显著		显著	非常显著			基本显著	
效 应 值	水平 1	-0.55	-0.04	-2.02	-2.06	-0.57	0.85	2.21	-0.61
	水平 2	-1.17	0.96	2.77	3.25	-1.04	0.80	0.53	-0.43
	水平 3	2.59	1.37	0.45	-0.21	-0.48	-1.32	-0.63	0.06
	水平 4			-1.21	-0.98	2.10	-0.33	-2.31	0.99

(4) 垂向渗透率对周期注水提高采收率效果影响显著。垂向渗透率越低，周期注水效果越好，但不能为零，否则层段间交渗不能发生。

(5) 原油粘度对周期注水提高采收率效果影响不显著。但从方差分析效应值可看出随着原油粘度增大，周期注水提高采收率效果变好。这也是因为常规水驱条件下高原油粘度油层低渗透层段残余储量大，从而使周期注水提高采收率的潜力增大。

(6) 早期周期注水效果更加明显。周期作用时间越长，高低渗透层段间交渗作用越充分。

(7) 在运用正交试验法设计模型时，本文选择了十周期分别为半月、1月、2月和变周期（半周期长顺序为半月、1月、2月）四种情况，然后又适当补加了几个模型。方差分析表明，周期长短对周期注水采收率提高值影响不显著（表 5）。

表 5 注水压力、周期长短影响周期注水采收率数据

注水流压 MPa	1/2 月		2/3 月		1 月		4/3 月		2 月		常规注水 采收率 (98%)
	同注 水量	含水 98%	同注 水量	含水 98%	同注 水量	含水 98%	同注 水量	含水 98%	同注 水量	含水 98%	
23	42.7	43.7	42.6	43.6	42.5	43.5	42.5	43.4	42.3	43.3	39.1
25			42.5	43.4			42.3	43.0	42.1	43.0	38.8
28	42.3	43.1	42.3	43.0	42.2	42.9	42.1	42.7			38.3

(8) 方差分析与追加模型计算均表明, 注水井流压对周期注水提高采收率影响不明显(表 4 和表 5)。注水井流压的高低决定地层压力的高低, 只起到控制周期长度上限的作用, 与交渗流量大小并没有直接联系。前面已经阐明周期长短对最终采收率的提高效果的影响也不明显, 这就无疑决定了注水井流压对周期注水采收率提高效果的不敏感性。

2. 同含水下周期注水提高采收率影响因素分析

尽管采收率控制标准不同, 含水 98% 时周期注水提高采收率影响因素分析结果与同累积注水量情形相比仅有如下几点差异(表 6)。

表 6 周期注水提高采收率影响因素方差分析 (含水 98%)

结 果		韵 律	润湿性	渗透率 垂向分布 10 ⁻³ μm ²	垂 向 渗透率 (为水平渗透率倍数)	原油粘度 mPa·s	注水井 流 压 MPa	转 周 期 注水时期 a	周期长短 mon
S _因		61.1	380.5	575.1	435.6	90.7	138.5	118.4	64.5
f _因		2	2	3	3	3	3	3	3
F _因		1.5	9.6	9.7	7.3	1.5	2.3	1.9	1.1
显著性			显著	显著	显著				
效 应 值	水平 1	-1.7	-0.5	-3.3	5.0	1.4	-2.3	-2.2	0.8
	水平 2	0.7	3.8	7.3	1.4	-2.7	0.7	-1.5	0.2
	水平 3	1.5	-5.0	-1.9	-1.3	-0.1	-1.4	2.5	1.4
	水平 4			-2.0	-5.1	1.4	3.1	1.2	-2.3

(1) 润湿性对周期注水提高采收率的影响变得更加重要(仍然是油湿油层周期注水效果更明显)。

(2) 韵律对周期注水提高采收率效果的影响变得不显著。

(3) 垂向渗透率等于零时周期注水效果最好, 即周期注水解决层间矛盾更为有效。

(4) 周期注水时期的早晚对提高采收率效果影响不显著。

综上所述研究结果, 其结论是: 正韵律或复合韵律、强非均质性、油湿、较高原油粘度(但粘度不能超过水驱可行范围)油藏更适合于周期注水, 并且周期注水时机越早, 整体开发效果越好。

参 考 文 献

- 1 И. Н. 沙尔巴托娃, М. Л. 苏尔古切夫. 王福松译. 层状非均质油层的周期注水开发. 北京: 石油工业出版社, 1989
- 2 北京大学数学力学系概率统计组. 正交设计法. 北京: 石油化学工业出版社, 1976
- 3 马希文. 正交设计的数学理论. 北京: 人民教育出版社, 1981