

井筒管流、喷嘴节流及地层渗流耦合的 聚驱分注井分层流量调配方法 ——以大庆油田为例

李海成¹, 李啸峰¹, 高光磊¹, 徐德奎¹, 胡俊卿², 梁福民¹

(1. 中国石油 大庆油田分公司 采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163453; 2. 中国石油
大庆油田分公司 复合驱项目经理部, 黑龙江 大庆 163453)

摘要:在聚合物的注入过程中, 聚合物从井口注入后在油管内流动, 利用非牛顿流体力学原理建立垂向管流沿程压力损失方程。当聚合物溶液流过喷嘴时损失一部分压力与粘度。通过室内的聚合物溶液过喷嘴实验, 得出了喷嘴的长径比(L/D_1)及摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 之间的关系。应用纲量分析的方法, 建立了聚物流过喷嘴后的压力损失 Δp 和粘度损失 $\Delta \eta$ 的基本方程。结合实验数据, 利用SAS软件进行回归分析, 分别得到了压降及粘降关联公式。聚合物溶液流过喷嘴后进入地层, 在聚合物溶液压力的作用下, 聚合物溶液与岩石空隙的骨架相互挤压, 聚合物的注入量也随时间逐渐降低。按照非牛顿流体在地层岩石中的渗流特点建立的单相非牛顿流体径向流的偏微分方程, 结合大庆油田聚合物注入井的实际数据和前面的井筒管流、喷嘴节流产生的压力损失 Δp 和粘度损失 $\Delta \eta$ 来束缚方程的边界条件, 使用有限差分将方程离散, 并应用软件求解, 得出了聚合物注入压力、注入量与时间的关系, 为聚合物分层配产提供了理论依据。

关键词:喷嘴节流; 地层渗流; 流量调配; 井筒管流; 聚合物注入井; 大庆油田

中图分类号: TE35

文献标识码: A

Coupled conduit flow-throttled flow-seepage flow separate-layer injection rate allocation method for polymer injection wells: a case study from Daqing oilfield

Li Haicheng¹, Li Xiaofeng¹, Gao Guanglei¹, Xu Dekui¹, Hu Junqing², Liang Fumin¹

(1. Production Engineering and Research Institute, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China;

2. Project Department of Combination Flooding, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China)

Abstract: In the process of polymer flooding, polymer solution flows first through tubes in wellbore after injected from wellhead. A vertical conduit flow frictional pressure loss equation is set up according to the theory of non-Newtonian fluid mechanics. Usually, a part of pressure and viscosity will be lost when the polymer solution flows through a nozzle. The relationships of nozzle length to diameter ratio (L/D_1) with friction coefficient (λ) and Reynolds number (Re) can be established through experiment modeling the process of polymer solution flowing through nozzle. The basic equations of pressure loss Δp and viscosity loss $\Delta \eta$ are developed by using dimension analysis method. In combination with the experimental data, an incidence formula of pressure drawdown and dynamic viscosity loss can be built through regression analysis with SAS software. After polymer solution enters strata, it will squeeze the skeleton of rock under pressure of polymer solution and the injection rate will also decrease with time. Partial differential equations of single phase radial flow of non-Newtonian fluid is established according to the seepage characteristics of non-Newtonian flow. The equations are discrete by using the finite difference and solved by software with the boundary conditions of the equations constrained by the real data, pressure drawdown and dynamic viscosity loss caused by conduit flow and throttled flow. The relationships between injection pressure, injection rate and time are established, providing a theoretical basis for separate-layer polymer injection rate allocation.

Key words: nozzle throttle, formation seepage, flow rate allocation, wellbore conduit flow, polymer injection well, Daqing oilfield

收稿日期: 2012-09-26; 修订日期: 2013-07-23。

第一作者简介: 李海成(1979—), 男, 工程师, 采油工程, E-mail: lihaicheng@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油科学研究重大开发项目(2008E-1216)。

注聚井分层流量调配是分层注聚的关键环节,它决定着分层注聚的效果和成败,同时也关联着相关施工队伍的工作能力、工作量和费用。注聚井分层流量调配首先要通过井下测试来了解当前注聚井的注入情况,通过分层流量测试可知哪些层超注或欠注^[1-3];然后测试班组通过更换水嘴,限制高渗透层的注入量,提高低渗透层注入量,以满足配注方案中规定的各层配注量要求。然而,由于目前油田缺乏科学理论指导,只能用传统的钢丝作业采用“试配法”反复测调来实现分层配注方案要求。这种传统方法存在两大问题:一是测调强度高、工作量大、占用时间长,测试队伍的工作效率低;二是由于无法知道各层流量的衰减规律,所完成的调配结果只是短暂和非稳态的,从而造成实际效果上的较大差异^[4-6]。

聚合物溶液从井口流入到地层是一个复杂的流体力学问题,聚合物溶液由井筒经喷嘴剪切降解后流入低渗透层,经节流元件节流后流入高渗透层,整个过程是井筒管流、喷嘴节流与地层渗流的耦合流动。为使注聚井的各层实际流量与配注方案尽可能匹配,本文将柏努利方程和地层渗流方程联系起来,计算各层的喷嘴直径及井口压力。在各层喷嘴不符合要求的情况下,能通过最少的喷嘴调换工作量来达到配注方案的要求,最终提高调配精度和工作效率^[7-8]。

1 基本原理

注聚井的地层压力($p_{\text{地}}$)在一段时期内是相对稳定的,注聚的原动力源于井口的配注压力(p),配注压力加上液柱压力形成了嘴前压力($p_{\text{前}}$),液体流经水嘴后,形成嘴后压力($p_{\text{后}}$), $p_{\text{前}} > p_{\text{后}}$ 。只有 $p_{\text{后}} > p_{\text{地}}$ 时,聚合物溶液才能被注进油层。液体流经水嘴时会产生压力损失,一般流量越大压力损失越大,水嘴的流量与嘴前嘴后压差存在着一定的对应关系。另外,油层自身的吸水能力有强有弱,它与油层压力、渗透性、厚度等许多因素有关。对同一油层来说,嘴后压力越大,注聚量就越大。

1.1 井筒管流

如果假设聚合物溶液在井筒中流动为层流,油管光滑忽略摩擦阻力,流体不可压缩且仅考虑重力作用,注入聚合物溶液的垂直管流表示为^[9-10]:

$$\frac{p_1}{\rho g} + H_1 + \frac{av_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + H_2 + \frac{av_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

式中: a 为动能修正系数,对圆管流动 $a=2$; h_w 为水头损失,m; v 为平均流速,m/s; H 为高度,m; p_1, p_2 分别为喷嘴前、后的流动压力,MPa; ρ 为喷嘴前、后的流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为喷嘴前、后的重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

H_1, H_2 分别为喷嘴前、后的井口海拔高度,井底海拔高度,m; v_1, v_2 分别为喷嘴前、后的井口油箱内聚物流速,井底油管内聚物流速,m/s。

对于分层注聚井,考虑各层流动的控制方程为:

$$Q = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (2)$$

$$\frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_j}{\rho g} + \frac{av_j^2}{2g} - \frac{av_0^2}{2g} + h_{wj} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$v_0 = Q / \pi r_p^2 \quad (4)$$

$$v_j = (Q - \sum_{j=1}^j Q_j) / (\pi r_p^2) \quad (5)$$

式中: Q 为全井注入流量, m^3/d ; Q_j 为第 j 层注入量, m^3/d ; n 为注聚层数; j 为 n 层中的 j 层; p_0 为井口压力,MPa; p_j 为第 j 层的流动压力,MPa; v_0 为井口流体速度,m/s; v_j 为 j 层水嘴前的速度,m/s; h_{wj} 为第 j 层的水头损失,m; r_p 为油管内径,m。

1.2 喷嘴节流

喷嘴前、后(图1)流体压降 $\Delta p = p_1 - p_2$ (MPa),粘降 $\Delta \eta = \eta_1 - \eta_2$ (mPa · s 聚合物溶液的表观粘度)。

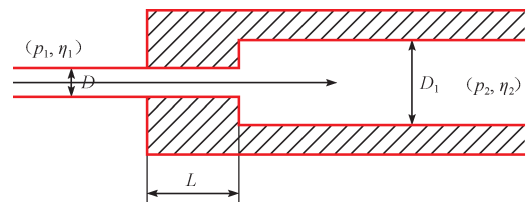


图1 带有喷嘴圆柱腔室的分层配注器模型

Fig. 1 Model of the separate-layer injector with a cylindrical chamber and a nozzle

D_1 ·配注器流道直径,mm; L ·喷嘴长度,mm; p_1 ·喷嘴前流动压力,MPa;
 p_2 ·喷嘴后流动压力,MPa; η_1 ·喷嘴前流体粘度,mPa · s;
 η_2 ·喷嘴后流体粘度,mPa · s

1.2.1 压降准则方程的建立

聚合物溶液属于一种非牛顿流体,流变性质接近于幂律流体。利用量纲分析方法,建立了偏心配注器中聚合物溶液在过喷嘴后的流动压降方程及粘降失方程,受篇幅限制,建立过程省略^[5]。过喷嘴后流动压降方程为:

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2}{2} \quad (6)$$

其中,无量纲量 $\lambda = 2f_6 \left(n, Re, \frac{L}{D_1} \right)$,即摩阻系数,可由实验数据回归分析得到。

粘降准则方程:

$$\Delta \eta = \xi \rho v D \quad (7)$$

其中,无量纲量 $\xi = f_6 \left(n, Re, \frac{L}{D_1} \right)$,即粘损系数,可由实验数据通过回归分析得到。

表 1 摩阻系数和雷诺数

Table 1 Statistics of friction coefficient and Reynolds number

λ	Re	L/D_1
2. 275 4310 250	6 588. 742 522	0. 545 833
1. 426 888 526	16 130. 979 250	0. 545 833
1. 235 337 513	26 432. 330 020	0. 545 833
2. 714 591 694	3 069. 307 218	0. 645 833
1. 857 102 224	8 020. 722 157	0. 645 833
1. 923 756 190	13 124. 904 590	0. 645 833
3. 294 619 514	2 374. 021 727	0. 745 833
2. 008 741 680	4 531. 534 140	0. 745 833
2. 010 179 679	7 937. 220 076	0. 745 833
...	...	...

表 2 粘损系数和雷诺数

Table 2 Statistics of viscosity loss coefficient and Reynolds number

ξ	Re	L/D_1
$6. 61 \times 10^{-5}$	7 874. 223	0. 495 833
$6. 81 \times 10^{-5}$	17 931. 470	0. 495 833
$1. 01 \times 10^{-5}$	29 452. 410	0. 495 833
$8. 49 \times 10^{-5}$	6 588. 743	0. 545 833
$8. 47 \times 10^{-5}$	16 130. 980	0. 545 833
$1. 18 \times 10^{-5}$	26 432. 330	0. 545 833
$4. 28 \times 10^{-5}$	4 089. 405	0. 595 833
$1. 16 \times 10^{-5}$	16 221. 130	0. 595 833
$2. 53 \times 10^{-5}$	4 329. 103	0. 595 833
...	...	...

式中; n 为幂律流体流性指数; ρ 为聚合物溶液的密度, $g \cdot cm^{-3}$; v 为聚合物溶液注入的平均流速, m/s 。

根据实验测得的相关数据,计算得到摩阻系数(λ)和雷诺数(Re)见表 1,粘损系数(ξ)和雷诺数(Re)见表 2(由于受篇幅限制,只列部分实验数据)。

1. 2. 2 摩阻系数的回归分析及曲线的绘制

结合实验数据,利用 SAS 软件进行回归分析,分别得到了压降及粘降关联公式。通过对表 1 中数据的回归得到了聚合物溶液在圆柱腔室中流动的摩阻系数回归公式^[6]:

$$\lambda = 10^{1.312\ 366} (Re)^{-0.220\ 738} \left(\frac{L}{D_1}\right)^{1.077\ 889} \quad (8)$$

由将摩阻系数回归公式(8)代入公式(6),得到了压降计算公式:

$$\Delta p = \left[10^{1.312\ 366} (Re)^{-0.220\ 738} \left(\frac{L}{D_1}\right)^{1.077\ 889} \right] \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (9)$$

利用公式(9),绘制聚合物溶液在带有喷嘴的圆柱腔室中流动时的雷诺数 Re 与摩阻系数 λ 的关系曲线。

利用压降方程,能绘制出不同喷嘴直径下聚合物溶液流动时的压降与流量的关系曲线,可以更直观的反映出压降随喷嘴直径以及流量的变化规律,以及受其影响程度的大小。不同水嘴下的嘴前嘴后压力与流量关系如图 2 所示。

1. 2. 3 粘损系数的回归分析及曲线的绘制

结合实验数据,利用 SAS 软件进行回归分析,分别得到了压降及粘降关联公式。由表 2 中数据得到聚合物溶液在带有喷嘴的圆柱腔室中流动的粘损系数回归公式:

$$\xi = 10^{-7.021\ 251} (Re)^{0.511\ 334} \left(\frac{L}{L_1}\right)^{-2.547\ 148} \quad (10)$$

由粘损系数回归公式(10),即得到了粘度损失计算公式:

$$\Delta \eta = \rho v D \left[10^{-7.021\ 251} (Re)^{0.511\ 334} \left(\frac{L}{D_1}\right)^{-2.547\ 148} \right] \quad (11)$$

通过公式 11 计算得出聚合物溶液的粘损率 ζ ,以及它们所对应的流量 Q ,绘制不同喷嘴直径下聚合物溶液流动时的粘损与流量的关系曲线。可以更直观的反映出粘损随喷嘴直径以及流量的变化规律,以及受其影响程度的大小。不同水嘴下的嘴前嘴后粘度与流量关系如图 3 所示。

1. 3 地层渗流

地层渗流涉及到不同的渗流模型、地质条件、不同的井型及不同的边界,是一个非常复杂的体系,受文章篇幅的影响,这里以均质定压边界地层直井为例,给出地层渗流方程^[11-12]。

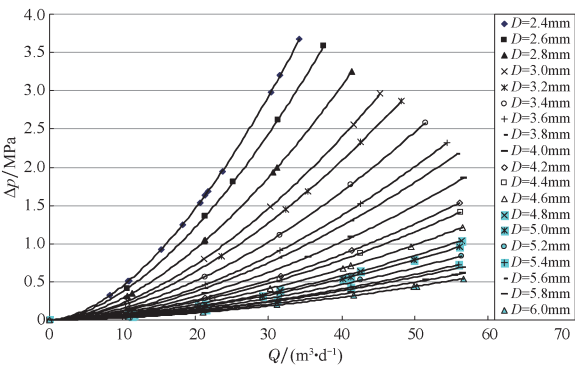


图 2 压降和流量关系

Fig. 2 Pressure drawdown Δp vs. flow rate Q

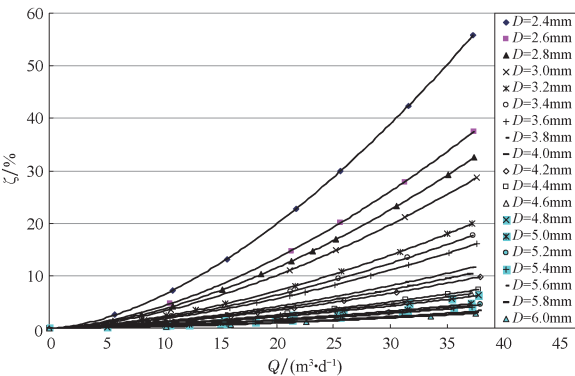


图 3 粘损率和流量关系

Fig. 3 Viscosity loss vs. flow rate Q

1.3.1 非牛顿流体渗流方程

在均质定压地层中,假设地层及地层中的流体满足如下条件^[13-15]:

- ① 油层均质等厚;
- ② 流动为径向流;
- ③ 系统的压缩系数为常数,且很小;
- ④ 忽略重力;
- ⑤ 地层边界压力恒定。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi C}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

$$p_{r=r_{wf}} = p_{wf}$$

$$p_{r=r_e, t} = p_i$$

$$p_{r, t=0} = p_i$$

式中: r 为距注入井距离, m; p 为地层压力, MPa; t 为注入时间, d; μ 为聚合物粘度, mPa · s; ϕ 为地层孔隙度, %; K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; C 为岩石体积压缩系数, 无量纲; r_{wf} 为注入井半径, m; r_e 为井控半径, m; p_i 为原始地层压力, MPa。

1.3.2 非牛顿流体渗流方程有限差分格式

应用有限差分法将单相非牛顿流体不稳定渗流数学模型展开^[16-18]:

$$\frac{1}{n\Delta r} \frac{\left[\frac{n+1}{\mu_i^{n+1}} (p_i^{n+1} - p_i^n) - \frac{n}{\mu_i^n} (p_i^n - p_i^{n-1}) \right]}{\Delta r} = \frac{\phi C}{K} \frac{p_{i+1}^n - p_i^n}{\Delta t} \quad (13)$$

经过推导后的迭代方程:

$$p_{i+1}^n = \left[1 - \left(\frac{n+1}{\mu_i^{n+1}} + \frac{n}{\mu_i^n} \right) \frac{K}{\phi C n} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right] p_i^n + \frac{K}{\mu_i^n \phi C} p_i^{n-1} + \frac{(n+1)K}{\mu_i^{n+1} \phi C n} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} p_i^{n+1} \quad (14)$$

地层边界定压、注入井定注入压力条件的有限差分表达式:

$$(p)_{n=1, i} = p_{wf}$$

$$(p)_{n=1, i} = p_i$$

$$(p)_{n, i=1} = p_i$$

应用有限差分法结合不同的地层条件, 就可以得到注聚井的注入量、注入压力和地层压力等参数。

2 计算实例

按照大庆油田某聚驱分注井的地质参数建立地层模型, 结合聚物流体的节流规律和非牛顿流体不稳定渗流数学模型, 对聚合物分注中的井筒管流、喷嘴节流和地层渗流三个过程进行耦合计算。大庆某聚驱分

注井第一层基本数据如表3, 使用上述方法所计算的不同井口压力的注水量随时间变化关系图4所示。

图4为对聚合物分注中的井筒管流、喷嘴节流和地层渗流三个过程进行耦合计算结果。该结果表明不同的井口压力条件下, 注入量随时间的变化规律是不同的, 井口压力较小时, 相同时间下的注入量也较小; 相同井口压力下, 注入量随时间增加而减小, 并且在注聚初期注入量的衰减速度较快, 尤其在流量调配的最初几小时, 流量衰减速度非常快, 当注聚合物一段时间后流量逐渐平稳。图4也表明不同时间地层的吸液能力是不同的, 并且在注入初期, 注入量差异大, 地层的吸液能力差异也比较大。

图5为对聚合物分注中的喷嘴节流和地层渗流两个过程进行耦合计算结果。该图为不同时间下注入井井控半径内地层压力分布状况。从图中可以看出, 地层中压力分布成明显的漏斗形状, 即近井地带压力高, 压降大, 动用好, 注入量大; 远井地带压力低, 压降小, 动用差。在注聚井运行初期, 近井地带的压降极大, 在距离注入井10 m的地方, 压力损失已达到一半; 在注入井运行一段时间后, 压力漏斗逐渐趋于平缓, 近井地带得到了有效的动用, 压降也比较平缓; 但在远井地带压力仍然偏低, 压降也较小, 动用较差; 特别是在距注入井100 m以外的地层, 地层压力接近原始地层压力, 压降几乎为零。对比图5中的注入1 d, 100 d和150 d曲线可发现, 随着注入时间的增加, 压力的传播速度将

表3 分注井单层基本参数

Table 3 Basic parameters of single layer in separate-layer injection wells

参数	数值	参数	数值
原始地层压力/MPa	14.031	体积系数	1.12
渗透率/ μm^2	0.010 3	水嘴半径/mm	4
地层厚度/m	50.6	流体粘度/(mPa · s)	27.6
注入层深度/m	1 200	孔隙度	0.19
井控半径/m	150	井径/m	0.124

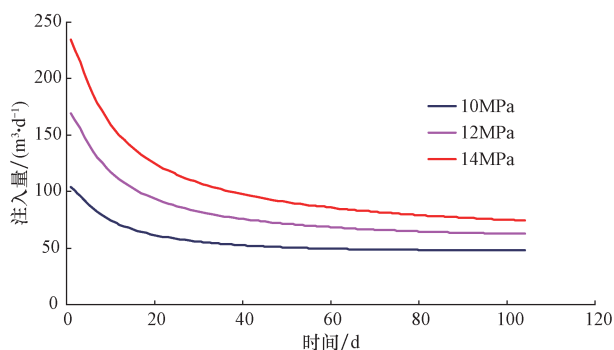


图4 4 mm水嘴在不同井口注入压力下注入量随时间变化关系
Fig. 4 Injection rate vs. time for injection operation with the nozzle of 4 mm diameter under different wellhead injection pressures

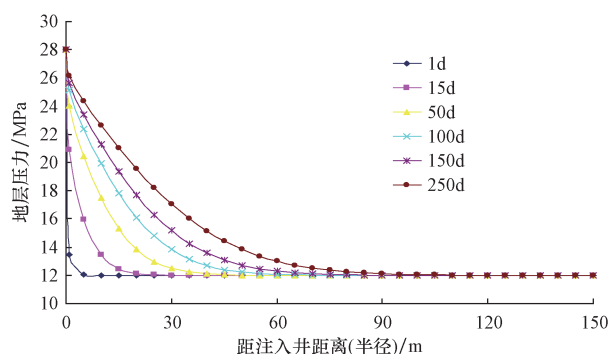


图5 4 mm喷嘴在井口注入压力一定的条件下
不同注入时间地层压力分布状况

Fig. 5 Reservoir pressure distribution at different times during injection operation with the nozzle of 4 mm diameter at a constant wellhead injection pressure

会越来越慢,因此即使长时间注聚,远井地带(距离注入井100 m以外)的地层有效动用的可能性仍然较小,该部位有形成死油区的可能。

3 结论

1) 综合分析了大庆油田聚合物注入井的整个过程,得到了聚合物注入全过程的压力的损失准则。

2) 由于聚合物溶液在地层岩石骨架的相互作用,地层渗流阻力逐渐增大。聚合物井的注入量因此也随时间衰减,聚合物注入初期衰减速度较快,然后衰减速度逐步降低,聚合物井注入量逐渐趋于稳定。

3) 聚合物注入井的近井地带,压力梯度大渗流阻力小聚合物易于流动,在距离注聚井较远的地层,动用较差,易形成死油区。

参 考 文 献

- [1] 王德民. 大庆油田高含水期开采技术研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(3): 81-87.
Wang Demin. Daqing oilfield high water cut mining technology[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1989, 8(3): 81-87.
- [2] 王凤兰, 石成方, 田晓东, 等. 大庆油田“十一五”期间油田开发主要技术对策研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 62-66.
Wang Fenglan, Shi Chengfang, Tian Xiaodong, et al. Study on main technical strategy of oilfield development during the Eleventh Five-Year Plan in Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(2): 62-66.
- [3] 牛为民, 徐劭, 吕明军. 测调集成式细分注水井分层流量测试技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(3): 38-39.
Niu Weimin, Xu Shao, Lu Mingjun. Zonal flow measurement technique of testing and adjusting integrated sub divided water injection wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(3): 38-39.
- [4] 王玲, 梁福民, 高瑞林, 等. 聚合物单管多层分质分压注入技术[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(2): 73-75.
Wang Ling, Liang Fumin, Gao Runlin, et al. Polymer separate injection technology with separate mass and pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(2): 73-75.
- [5] 裴晓含, 梁福民, 崔海清, 等. 聚合物驱偏心分质注入技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 26(5): 65-66, 70.
Pei Xiaohan, Liang Fumin, Cui Haiqing, et al. Polymer flood inge-centric quality sorting injection technology[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 26(5): 65-66, 70.
- [6] 邹艳华, 李远, 那贺忠. 注水井分层流量调配方法研究[J]. 油气井测试, 2003, 11(3): 7-9.
Zou Yanhua, Li Yuan, NA Hezhong. Note well stratified flow allocation method[J]. Oil and Gas Well Testing, 2003, 11(3): 7-9.
- [7] 李海成. 大庆油田聚合物驱分注工艺现状[J]. 石油与天然气地质, 2012, 34(2): 296-301.
Li Haicheng. Overview of separate injection technique for polymer flooding in Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 34(2): 296-301.
- [8] 陈晓红, 段宏. 聚合物单管多层分注技术原理及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(4): 53-55.
Chen Xiaohong, Duan Hong. Principle and application of separate zone polymer flooding in multi zone reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(4): 53-55.
- [9] 单晶, 马宏伟, 袁云, 等. 聚合物驱井下单管多层分注工艺[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(3): 35-37.
Shan Jing, Ma Hongwei, Yuan Yun, et al. Study on downhole separate layer injection of polymer in multi-layer reservoirs[J]. Oil Drilling Production Technology, 2005, 27(3): 35-37.
- [10] 李晶, 王耀东, 邱振伟, 等. 分层注聚管柱的研究与应用[J]. 石油矿场机械, 2004, 33(增刊): 100-102.
Li Jing, Wang Yaodong, Qiu Zhenwei, et al. Research and application on the separated layer polymer injection pipe string[J]. Oil Field Equipment, 2004, 33(S1): 100-102.
- [11] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.
Wu Wangyi. Fluid dynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 1982.
- [12] 程心一. 计算流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Zheng Xinyi. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [13] 杨文军, 卢德唐, 李颖川. 井筒管流与地层渗流耦合的注水井分层流量调配方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 8(3): 79-83.
Yang Wenjun, Lu Detan, Li Yingchuan. Adjustment of respective layer flow rate in injection well through coupling of wellbore pipe-flow and stratum filtering flow[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2009, 8(3): 79-83.
- [14] 李朝霞, 夏惠芬. 聚合物溶液对孔隙结构特征的影响[J]. 石油与天然气地质, 2012, 3(2): 86-91.
Li Zhaoxia, Xia Huifen. Effect of polymer solution on pore structure characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 3(2): 86-91.
- [15] 何胡军, 王秋语, 程会明. 孤岛中一区聚合物驱后储层参数变化规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 34(2): 255-259.
He Hujun, Wang Qiuyu, Cheng Huiming. A study on reservoir parameter changes after polymer injection in Block 1 of the central Gudao[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 34(2): 255-259.
- [16] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Zhai Yunfang. Seepage mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [17] 卢德唐, 郭冀义, 郑新权. 试井分析理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Lu Detang, Guo Mingyi, Zheng Xingquan. Well test analysis theory and methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [18] 刘露, 李华斌. 渗透率变异系数对聚合物驱油影响的数值模拟研究[J]. 油田化学, 2011, 4(3): 7-9.
Liu Lu, Li Huabin. Numerical simulation of the permeability variation coefficient effect on polymer flooding[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 4(3): 7-9.

(编辑 董立)