

Productivity Calculation Method for Injection-Production Pattern in Xinjiang Mobei Low Permeability Reservoirs

Shusheng Gao^{1,2}, Xinghe Yu¹, Huaxun Liu², Zhiming Hu²

¹School of Energy Resources, China University of Geoscience, Beijing

²Institute of Porous Flow & Fluid Mechanics, Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, China National Petroleum Corporation, Langfang

Email: gaoshusheng69@petrochina.com.cn

Received: Sep. 19th, 2011; revised: Oct. 23rd, 2011; accepted: Oct. 27th, 2011.

Abstract: Productivity formulas of conventional reservoir's well-net are based on single-phase flow or oil-water mobility ratio is 1 under the condition of piston water flooding. But this is not consistent with the actual process in low permeability reservoirs. According to the water driving characteristics of areal well pattern injection-production unit, the flow region is divided into three zones in this paper. Productivity formula is derived based on the equivalent flowing resistance method considering the low permeability reservoir characteristics of oil-water two-phase flow capacity of the flooding pattern. Compare the productivity formula with the conventional productivity formula. The results show that when the dimensionless liquid production index change little with water saturation, close to 1, the two calculated results are consistent; when the dimensionless liquid production index change great with water saturation, much less than 1, the results of conventional capacity formula are obvious big, and the error calculation is increasing with the decreases of the dimensionless liquid production index; The production formula established is more in line with Mobei low permeability reservoirs.

Keywords: Low Permeability Reservoir; Productivity Formula; The Equivalent Flowing Resistance Method; Dimensionless Liquid Production Index

新疆莫北低渗透油藏注采井网产能计算方法研究

高树生^{1,2}, 于兴河¹, 刘华勋², 胡志明²

¹中国地质大学能源学院, 北京

²中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流所, 廊坊

Email: gaoshusheng69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2011年9月19日; 修回日期: 2011年10月23日; 录用日期: 2011年10月27日

摘要: 常规油藏井网产能公式都是基于单相渗流或油水流量比为1、水驱油为活塞式驱的假设条件上建立的, 这些假设条件在低渗透油藏水驱油实际过程中并不成立。本文根据联合面积布井注采单元的水驱油特征, 将流动区域划分为三个区, 运用等值渗流阻力理论, 建立了考虑低渗透油藏油水两相渗流特征的注采井网产能公式的通式, 并与常规注采井网产能公式进行对比, 结果表明, 当无因次采液指数随含水饱和度变化较小, 趋近于1时, 两者计算结果一致; 而当无因次采液指数随含水饱和度变化较大, 远小于1时, 常规产能公式计算结果明显偏大, 而且无因次采液指数越低, 常规产能公式计算结果误差越大; 本文建立的产能公式计算结果更加符合莫北低渗透油藏注采井网油井的实际产能。

关键词: 低渗透油藏; 产能公式; 等值渗流阻力理论; 无因次采液指数

1. 引言

在低渗透油藏大规模开发过程中, 低渗透油藏注

采井网的有效性越来越受到关注, 而最能体现注水有效的参数就是油井产能, 油井产能的高低决定了对应

注水井的注水效果^[1-2]，因此，准确计算油井产能对于低渗透油田开发具有重要意义。而现有的产能公式多基于单相渗流或油水流量比为 1、水驱油为活塞式驱替这样的假设条件上建立的^[3-8]这些假设条件与低渗透油藏实际的水驱过程相差甚远^[9]。有必要建立反映低渗透油藏水驱油真实驱替过程的油井产能模型，准确预测油井产能。本文根据莫北低渗透油田注采井网的实际水驱油特征，将油水井间的流动区域划分为三个区，运用等值渗流阻力理论，建立了考虑低渗透油藏油水两相渗流特征的注采井网产能公式的通式，该项研究对于低渗透油藏注水开发有效性评价具有重要意义。

2. 低渗透油藏油水两相渗流特征

低渗透油藏由于具有微孔喉多、比表面大的特点，造成其液-固及液-液间作用力较强，油水两相渗流阻力远大于单相渗流阻力，油水两相渗流时两相相对渗透率之和远小于 1，无因次采液指数和无因次采油指数均随含水饱和度增加而显著降低。图 1 是莫北低渗透油层 J_{1s2} 岩心标准化的油水相渗曲线，图 2 是无因次采液指数和无因次采油指数曲线，可以看出，在含水饱和度较高时油水两相相对渗透率之和比 1 小得多；而随着含水饱和度增加，两个油层无因次采油指数都迅速降低，无因次采液指数下降也很明显，但是 J_{1s2}² 储层无因次采液指数下降较为平缓，后期携液能力更强，物性和开发效果较好一些。

3. 联合面积布井产能公式的通式研究

以五点法注采单元为例(见图 3)，水驱油为非活塞式驱，忽略油水间的毛管力，在均质理想条件下，可将其渗流过程分为 3 个不同的渗流阻力区：

1) 从注水井底到水驱前缘 R_{wf} 的径向两相渗流区(对应着图 3 绿色区域内)，简称注水井内部阻力区，渗流阻力设为 R_1 ，每 1 口注水井供应 4 口生产井，根据等值渗流阻力理论，可得：

$$R_1 = \int_{r_w}^{r_{wf}} \frac{1}{2\pi r k h} \frac{1}{\left(\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w}\right)} dr \quad (1)$$

其中，水驱前缘内含水饱和度分布：

$$r^2 - r_0^2 = \frac{f_w}{\pi h \phi} \int_0^t q_w d\tau \quad (2)$$

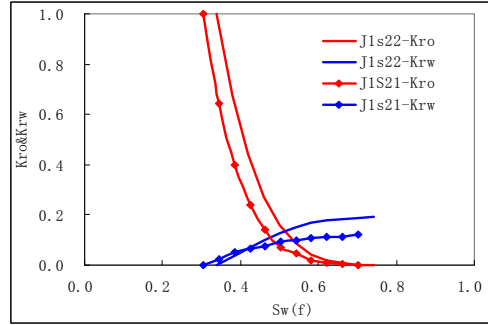


Figure 1. Oil-water relative permeability curve of low permeability reservoir J_{1s2}

图 1. 低渗透油层 J_{1s2} 油水相渗曲线

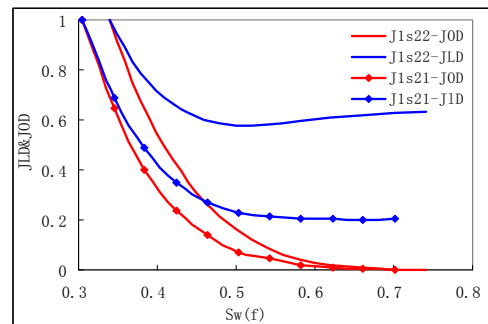


Figure 2. Non-dimensional mining liquid index and oil production index curve of low permeability reservoir J_{1s2}

图 2. J_{1s2} 油层无因次采液指数和采油指数曲线

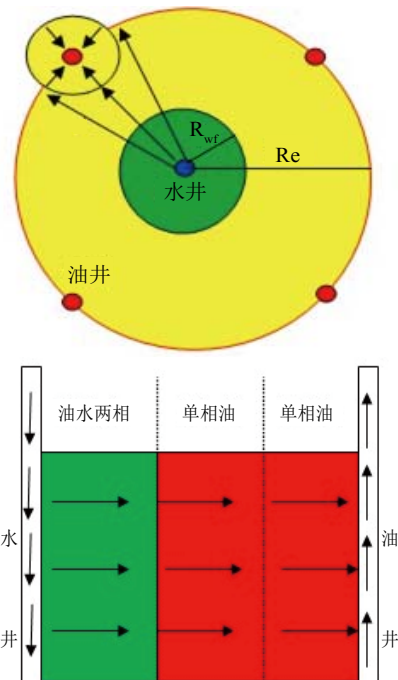


Figure 3. Diagram of seepage resistance area division and flow in five Wells nets

图 3. 五点井网渗流阻力区划分及流动示意图

2) 注水前缘到排油坑道半径 R_e 处径向单相油渗流区(对应着图 3 黄色圆环区域内), 简称外部阻力区, 渗流阻力设为 R_2 , 根据等值渗流阻力理论, 可得:

$$R_2 = \frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{r_{wf}} \quad (3)$$

其中, 排油坑道半径 R_e 的表达式:

$$R_e = \frac{\sqrt{2}}{2} d \quad (4)$$

3) 从排油坑道到生产井的径向单相油渗流阻力即

区(对应着图 3 围绕油井的黄色圆饼区域内), 简称油井渗流阻力区, 渗流阻力设为 R_3 , 根据等值渗流理论, 可得:

$$R_3 = \frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{4r_w} \quad (5)$$

有了上述 3 项流动阻力, 根据水电相似原理和欧姆定律, 有如下形式的单井产能公式:

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (6)$$

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{B_o \left[\int_{r_w}^{r_{wf}} \frac{1}{2\pi r kh} \frac{1}{\left(\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right)} dr + \frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{r_{wf}} + \frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{4r_w} \right]} \quad (7)$$

一般地, 可得到联合面积布井产能公式的通式:

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{mB_o \left[\int_{r_w}^{r_{wf}} \frac{1}{2\pi r kh} \frac{1}{\left(\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right)} dr + \frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{r_{wf}} + \frac{\mu_o}{2m\pi kh} \ln \frac{R_e}{2(m+1)r_w} \right]} \quad (8)$$

其中, 五点法: $m=1$, $R_e = \frac{\sqrt{2}}{2} d$; 七点法: $m=2$, $R_e = d$; 反九点法 $m=3$, $R_e = \sqrt{2}d$ 。

当将水驱油退化为活塞式驱替, 油水流动比为 1 时, 式(8)简化为:

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{mB_o \left(\frac{\mu_o}{2\pi kh} \ln \frac{R_e}{r_w} + \frac{\mu_o}{2m\pi kh} \ln \frac{R_e}{2(m+1)r_w} \right)} \quad (9)$$

以五点井网为例, 式(9)可改写成如下形式:

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{\frac{B_o \mu_o}{\pi kh} \left(\ln \frac{d}{r_w} - 1.040 \right)} \quad (10)$$

而根据势理论及叠加原理导出的五点井网产能公式^[10]:

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{\frac{B_o \mu_o}{\pi kh} \left(\ln \frac{d}{r_w} - 0.9656 \right)} \quad (11)$$

式(11)与式(10)对比可以看出: 等值渗流阻力理论导出五点井网油井产能公式与根据势理论及叠加原理导出的五点井网油井产能公式表达式基本一致, 以

$d=200$ m, $r_w=0.1$ m 来说两者之间相对误差 1%, 符合油藏工程方法要求, 三区理论和等值渗流阻力理论可用于低渗透油藏联合面积布井产能研究。

4. 三区渗流理论产能公式计算流程

1) 输入基础数据, 主要包括孔隙度 ϕ , 渗透率 k , 储层有效厚度 h , 注采压差 ΔP , 期望时间 T 和时间间隔 dt , 油水相渗曲线和井网类型等等。

2) 根据第 n 步累计注水量计算第 $n+1$ 步注水前缘半径 R_{wf} 、前缘内含水饱和度分布、三区渗流阻力和第 $n+1$ 步产油量和第 $n+1$ 步注水量。如此循环, 直至计算到时间 T 。

3) 计算期望时间 T 内平均产油量 q_o , 即油井产能。

5. 不同井网实例对比分析

分别讨论不同无因次采液指数曲线下对比分析常

规方法和本文方法计算的单井产能，其中常规方法依据联合面积布井产能公式计算单井产能，表达式如下：

五点井网产能公式：

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{\frac{B_o\mu_o}{\pi kh} \left(\ln \frac{d}{r_w} - 0.9656 \right)} \quad (12)$$

反七点井网产能公式：

$$q = \frac{\Delta P}{\frac{3\mu B_o}{2\pi kh} \left(\ln \frac{d}{r_w} - 0.5691 \right)} \quad (13)$$

反九点井网产能公式：

$$q = \frac{0.0864\Delta P}{2 \frac{B_o\mu_o}{\pi kh} \left(\ln \frac{d}{r_w} - 0.1733 \right)} \quad (14)$$

以莫北油田莫 116 井区三工河组油藏为例，其中基础参数： $d = 280 \text{ m}$ ， $u_w = 0.28 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $r_w = 0.1 \text{ m}$ ， $\phi = 0.13$ ， $\Delta P = 6 \text{ MPa}$ ， $B_o = 1.337$ ，下面就无因次采液指数特征分三种情况进行讨论。

①水后无因次采液指数急剧下降型

以莫 116J₁S₂¹ 油层为例，相渗曲线和无因次采液指数曲线如图 1 和图 2 所示，见水后无因次采液指数急剧下降，其中 $u_o = 0.48 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $h = 10 \text{ m}$ ， $k = 17.11 \text{ mD}$ 。根据常规产能公式和本文导出的产能公式计算的油井产能如表 1 所示。可以看出两种方法计算结果相差较大，而莫 116J₁S₂¹ 油层采用反七点井网，实际单井产能 $12 \text{ m}^3/\text{d}$ ，与本文方法计算结果较为一致。

②见水后无因次采液指数缓慢下降型

以莫 116J₁S₂² 油层为例，相渗曲线和无因次采液指数曲线如图 1 和图 2 所示，见水后无因次采液指数有一定程度下降，但是幅度不大，而且后期还有回升的趋势，最终无因次采液指数保持在 0.6 以上。其中 $u_o = 0.92 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $h = 19.8 \text{ m}$ ， $k = 8.22 \text{ mD}$ 。根据常规产能公式和本文导出的产能公式计算的油井产能如表 2 所示。可以看出两种方法计算结果也同样存在一定的差距，只是差距要比莫 116J₁S₂¹ 油层小的多。本文三区等值渗流理论导出的产能公式计算的产能与莫 116J₁S₂² 油层反七点井网实际单井产能 $14 \text{ m}^3/\text{d}$ 比较接近，同样证明本文应用产能公式计算结果更为可信。

③见水后无因次采液指数降低较小型

假设某一油层其油水相渗曲线、储层厚度和渗透

率均与莫 116J₁S₂² 油层一致，地层原油粘度 $u_o = 1.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。根据常规产能公式和本文导出的产能公式计算的油井产能如表 3 所示，从表中可以看出两种方法计算结果较为一致，相差较小。由此可见，当油层水驱油开发过程中无因次采液指数变化很小，那么常规产能公式的应用误差很小，说明在中高渗储层开发过程中应用常规产能公式计算产能是完全可靠的；但是低渗油藏开发的无因次采液指数一般都比较低，二种方法计算的产能结果差距比较大，因此再应用常规产能公式计算油井产能误差就会很大，应该运用适合低渗油藏三区渗流理论导出的油井产能公式，计算结果更为准确。

6. 结论

1) 等值渗流阻力法是求解联合面积布井产能简单而有效的方法，这种方法通过对阻力区的划分可以得到满足油藏工程计算联合面积布井产能公式。

2) 相对于常规产能公式来说，将联合面积布井注采单元流动区域化为三区，运用等值渗流阻力法导出的产能公式更适合于低渗油藏的产能计算。

Table 1. Productivity calculation results of Mobei 116 reservoir

表 1. 莫 116J₁S₂¹ 油层产能计算结果

井网类型\产能公式	常规方法 (m ³ /d)	本文方法 (m ³ /d)
五点井网	62.9	23.9
反七点井网	39.4	12.9
反九点井网	28.0	8.8

Table 2. Productivity calculation results of Mobei reservoir J₁S₂²

表 2. 莫北油田 J₁S₂² 油层产能计算结果

井网类型\产能公式	常规方法 (m ³ /d)	本文方法 (m ³ /d)
五点井网	31.2	24.6
七点井网	19.6	14.6
九点井网	13.9	10.2

Table 3. Productivity calculation results of virtual reservoir

表 3. 虚拟油层产能计算结果

井网类型\产能公式	常规方法 (m ³ /d)	本文方法 (m ³ /d)
五点井网	19.2	19.1
七点井网	12.0	12.0
九点井网	8.5	8.5

3) 当见水后无因次采液指数变化较小, 趋近 1 时, 常规产能公式与本文导出的产能公式计算结果基本一致。

参考文献 (References)

- [1] 李恕军, 柳良仁, 熊维亮. 安塞油田特低渗透油藏有效驱替压力系统研究及注水开发技术调整[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 62-65.
- [2] 宋付权, 许友生. 油藏注采系统有效性初探[C]. 南京: 第五届全国水利工程渗流学术研讨会, 2006.
- [3] 蒋廷学, 单文文, 杨艳丽. 垂直裂缝井稳态产能的计算[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 61-63.
- [4] 杨思玉, 胡永乐等. 新油田生产能力确定方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 750-754.
- [5] 宋付权, 刘慈群. 变形介质油藏压力产量分析方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 57-58.
- [6] 孙彦达, 王永卓. 大庆外围低渗透油田产能预测影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 73-76.
- [7] 计秉玉, 李莉, 王春艳. 低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 256-261.
- [8] 胥元刚, 刘顺. 低渗透油藏油井流入动态研究[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 77-80.
- [9] 林玉保, 杨清彦, 刘先贵. 低渗透储层油、气、水三相渗流特征[J]. 石油学报, 2006, 27(S): 124-128.
- [10] 孔祥言. 高等渗流力学(第二版)[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010.

符号注释

K ——储层渗透率, mD; ΔP ——注采压差, MPa; h ——储层有效厚度, m; R_c ——折算的排油坑道半径, m; d ——相邻两口油井间距离, m; ϕ ——孔隙度, 小数; S_{wf} ——水驱前缘含水饱和度, 小数; K_{rw} ——水相相对渗透率, 小数; K_{ro} ——油相相对渗透率, 小数; f_w ——含水率, 小数; u_o ——地层原油粘度, mPa·s; B_o ——原油体积系数, 无因次; μ_w ——地层水的粘度, mPa·s; q_o ——油井产量, m³/d; q_w ——水井注水量, m³/d; Q_w ——累计注水量, m³/d。