

# Adaptability Study on Dividing Approach of Accurate Water Injection in Well Block D

Long Wang<sup>1,2</sup>, Hongjun Yin<sup>1,2</sup>, Junting Zhang<sup>3</sup>, Huan Zhao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-Constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University, Daqing

<sup>2</sup>MOE Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Northeast Petroleum University, Daqing

<sup>3</sup>Bohai Oil Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin

Email: [wanglongwuyulunbi@126.com](mailto:wanglongwuyulunbi@126.com)

Received: Aug. 12<sup>th</sup>, 2014; revised: Sep. 5<sup>th</sup>, 2014; accepted: Sep. 10<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

How to determine the water injection rate of separate layers rationally and effectively is a key part of water injection adjustment. The quality of dividing will directly have an impact on the development effect, especially for multi-layer sandstone reservoirs with severe interlayer heterogeneity. On one hand, the well determined rational water injection rate for a single layer and well can effectively control the rise of water and ease the tension of interlayer contradiction; on the other hand, it can also reduce inefficient water injection and lessen the burden of oil production and surface gathering. Commonly, the effective thickness approach, formation coefficient approach, filtrational resistance coefficient approach and dividing coefficient approach are used to determine the water injection rate of separate layers. The approaches mentioned above are all used to determine the water injection rate of separate layers in Well Block D. By comparing the results and injection profile, the rational dividing approach can be determined.

## Keywords

Dividing Coefficient Approach, Filtrational Resistance Coefficient Approach, Separate Layer Water Injection, Accurate Water Injection, Water Injection Adjustment

## D井区精细注水劈分方法适应性研究

王 龙<sup>1,2</sup>, 尹洪军<sup>1,2</sup>, 张俊廷<sup>3</sup>, 赵 欢<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 东北石油大学, 大庆

<sup>2</sup>提高油气采收率教育部重点实验室, 东北石油大学, 大庆

<sup>3</sup>中海石油(中国)有限公司, 天津分公司渤海石油研究院, 天津

Email: [wanglongwuyulunbi@126.com](mailto:wanglongwuyulunbi@126.com)

收稿日期: 2014年8月12日; 修回日期: 2014年9月5日; 录用日期: 2014年9月10日

## 摘要

如何合理有效地确定分层注水量是注水调整过程中一个重要的研究方面。尤其是对于多层砂岩油层, 层间非均质性较为严重, 劈分的好坏将直接影响到开发效果。确定单井单层合理注水量, 一方面可以有效地控制油井含水上升、减缓层间矛盾; 另一方面可以减少无效注水、缓解采油和地面集输处理的工作负荷。常用的计算分层注水量劈分方法有有效厚度法、地层系数法、渗流阻力系数法及劈分系数法。本文将以上几种方法同时应用在D井区上, 计算得到不同劈分方法的分层注水量。通过将劈分结果与吸水剖面资料对比, 确定出劈分系数法是D井区的合理注水量劈分方法。

## 关键词

劈分系数法, 渗流阻力系数法, 分层注水, 精细注水, 注水调整

## 1. 引言

分层注水技术是大庆油田在 20 世纪 60 年代针对注水过程中出现的层内、层间、平面矛盾而提出的注水工艺。通过控制高渗透层吸水量、强化低渗透层吸水量能够有效地减缓层间矛盾, 使得开发效果显著提高。国内外众多学者从单井注水量及产液量的劈分方法、影响因素的定性定量分析及分层注水工艺上都进行过深入的研究[1]-[5]。传统的分层注水量劈分采用的是有效厚度法或地层系数法。但该方法考虑的因素较少, 适应性较差[6]。渗流阻力系数法是以注采平衡为原则, 综合利用各项动态开发资料, 深入研究储层动用状况, 考虑措施改造和油井流压的影响, 建立各单井分层平面和垂向劈分系数的方法[7]。劈分系数法考虑的因素也较为全面, 包括渗透率、有效厚度、措施改造、注采井距、位置系数、注采井数等, 建立的劈分方程更能符合实际的劈分结果[8]-[10]。其他学者采用理论方法也对注水井分层配水量进行了研究[11]。例如崔传智等以层间均衡动用为目标, 利用 Buckley-Leverett 非活塞式水驱油理论, 建立了注水井分层配水量的计算方法。

不同的劈分方法在不同的地质条件和开发条件下具有不同程度的适应性, 需要结合实际区块进行分析, 选出最适合的劈分方法。本文将以上方法同时应用在 D 井区上, 通过计算分层劈分水量并进行对比, 确定出适合 D 井区的合理劈分方法。有效厚度法和地层系数法是按照各小层有效厚度和地层系数比例直接进行劈分, 原理较为简单。下面对渗流阻力系数法和劈分系数法的原理进行介绍。

## 2. 劈分方法原理

### 2.1. 渗流阻力系数法

渗流阻力系数法是以达西公式  $Q = \frac{KA\Delta p}{\mu L}$  为基础并经过变形, 根据水电相似原理, 以注水井为中心, 根据渗流理论推导得出。它主要考虑了井底流压、渗流阻力及改造措施系数对分层水量劈分的影响。同

一小层内若注水井周围有若干口油井同时射开，注水量向各油井方向的平面分配系数取决于油、水井间的渗流阻力系数和油井流压。设注水井第  $i$  小层周围有  $m$  口油井，渗流阻力系数分别为  $R_1, R_2, \dots, R_m$ ，第  $j$  口油井平面分配系数(如图 1 所示)：

$$\alpha_{ij} = \frac{P - P_j}{R_{ij} \sum_{j=1}^m \frac{P - P_j}{R_{ij}}} \quad (1)$$

式中： $R_{ij}$  为渗流阻力系数，且  $R_{ij} = \frac{\mu_o L_j}{M_{ij} H_{ij} K_{ij}}$ ； $\mu_o$  为原油粘度，Pa·s； $L_j$  为注水井距第  $j$  口油井的距离，

$m$ ； $K_{ij}$  为注水井第  $i$  个小层周围第  $j$  口油井该层的有效渗透率值， $m^2$ ； $H_{ij}$  为第  $i$  个小层周围第  $j$  口油井该层的有效厚度值， $m$ ； $P$  为注水井井底压力，Pa； $P_j$  为生产井井底流压，Pa； $M_{ij}$  为第  $i$  个小层周围第  $j$  口油井该层改造措施系数，小数。可以根据该地区改造措施的效果确定。如大庆油田统计结果，压裂后近期可增产一倍，故  $M=2$ ；未压裂的井层  $M=1$ ；堵水井层， $M$  取接近 0 的值。

设注水井射开  $n$  个小层，则注水井第  $i$  层垂向劈分系数  $C_i$  计算式为(如图 2 所示)：

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{P - P_j}{R_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{P - P_j}{R_{ij}}} \quad (2)$$

在注水井垂向劈分系数计算的基础上，根据注水井井口注水量，计算出注水井的分层注水量：

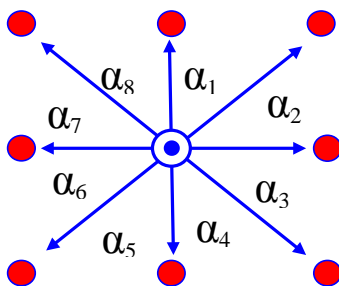


Figure 1. Plane dividing coefficient  
图 1. 平面分配系数示意图

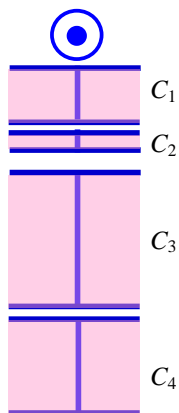


Figure 2. Vertical dividing coefficient  
图 2. 垂向劈分系数示意图

$$Q_{wi} = Q_w \times C_i \quad (3)$$

式中： $Q_{wi}$ 为注水井第  $i$  个小层分层注水量， $m^3$ ； $Q_w$ 为注水井井口注水量， $m^3$ 。

## 2.2. 劈分系数法

劈分系数法是由于洪文在参考文献[8]中提出的。它不仅考虑了地质因素的影响，也更多地考虑了油藏在开采过程中开发因素及人为因素对分层水量劈分的贡献。根据各油井的地质条件、驱油条件和开采条件，构建符合 D 井区的平面劈分系数  $\gamma_{ij}$  及垂向劈分系数  $\beta_{ij}$  为：

$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^m M_{ij} \alpha_{ij} N_{ij} (KH)_{ij} / \ln D_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \alpha_{ij} N_{ij} (KH)_{ij} / \ln D_{ij}} \quad (4)$$

$$(KH)_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^l K_{ijk} H_{ijk}}{l} \quad (5)$$

$$\beta_{ij} = \frac{M_{ij} \alpha_{ij} N_{ij} (KH)_{ij} / \ln D_{ij}}{\sum_{j=1}^m M_{ij} \alpha_{ij} N_{ij} (KH)_{ij} / \ln D_{ij}} \quad (6)$$

式中： $m$ ， $n$ ， $l$  分别为  $i$  注水井的总层数、井区注水井总井数及注水井连通的油井数； $M_{ij}$  为  $i$  注水井  $j$  层的措施改造系数，无因次； $\alpha_{ij}$  为  $i$  注水井  $j$  层的位置系数，无因次； $N_{ij}$  为  $i$  注水井  $j$  层的注采井数，无因次； $(KH)_{ij}$  为连通油井的  $i$  注水井  $j$  层段各方向地层系数  $K_{ijk} H_{ijk}$  的平均值，即平均方向地层系数， $\mu m^2 \cdot m$ ； $D_{ij}$  为  $i$  注水井  $j$  层的注采井距， $m$ ； $\gamma_{ij}$  为井区  $i$  注水井的劈分系数，无因次， $\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1$ ； $\beta_{ij}$  为  $i$  注水井  $j$  层段的垂向劈分系数，无因次， $\sum_{j=1}^m \beta_{ij} = 1$ 。

该劈分公式综合考虑了地质因素(地层渗透率、地层有效厚度)和人为因素(措施改造系数、注采井距、位置系数、注采井数)，可以用来计算单井单层劈分系数，并确定分层注水量。

## 3. 井区特征及实例应用

### 3.1. D 井区基本特征

D 井区位于 Y 油田的北部，主要开发层位为 FY 油层，共有 50 个沉积单元。含油面积为  $11.0 \text{ km}^2$ ，地质储量为  $960.28 \times 10^4 \text{ t}$ ，可采储量为  $268.84 \times 10^4 \text{ t}$ 。开发油层平均有效厚度为  $14.3 \text{ m}$ ，平均孔隙度为  $13.5\%$ ，平均空气渗透率为  $4.47 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。该井区砂体主要发育于 F 油层。F 油层砂体连续性较好，有效厚度发育集中于井区中部。Y 层砂体多呈孤立状、分散状，连续性较差。井区于 1993 年 9 月投入开发，采用反九点法面积井网，并与 2009 年逐步调整加密为线状注水井网。截止到 2013 年 7 月，累计产油  $179.03 \times 10^4 \text{ t}$ ，累计注水为  $472.713 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，综合含水为  $42.22\%$ ，采出程度  $18.64\%$ ，平均采油速度  $0.94\%$ 。自 2010 年实施转向压裂以来，增油效果明显好于普通压裂，较非转向压裂井日增油高  $0.6 \text{ t}$ 。2011~2012 年又重点实施了以单层轮注为主的层段周期注水等调整措施，改善了油层的动用状况，提高了注水效率。

由此可见，D 井区地质情况较为复杂，层段较多。开发过程中井网、井距不断变化，开发情况也较为复杂。

### 3.2. 实例应用

通过整理 D 井区吸水剖面资料及动静态资料, 采用有效厚度法、地层系数法、渗流阻力系数法及劈分系数法计算了单井单层的劈分水量。将计算的各井劈分结果与现有的吸水剖面资料进行比较, 计算结果如表 1 所示。

**Table 1. Single layer water injection rates of different dividing approaches**  
**表 1. 不同劈分方法分层注水量劈分结果**

序号	井名	小层	吸水剖面资料值 (m <sup>3</sup> /d)	有效厚度法 (m <sup>3</sup> /d)	地层系数法 (m <sup>3</sup> /d)	渗流阻力系数法 (m <sup>3</sup> /d)	劈分系数法 (m <sup>3</sup> /d)
1	D161	FI4	4.00	12.49	1.11	0.66	5.11
2	D161	FI7	6.00	8.84	33.18	9.50	9.17
3	D161	YI5	7.00	13.36	12.86	15.43	11.86
4	Y12-37	FI2	1.56	1.28	1.76	0.96	1.77
5	Y12-37	FI7	6.47	16.18	0.80	2.55	6.20
6	Y12-37	YI2	3.96	7.84	6.89	11.67	3.77
7	Y12-40	FI2	9.02	3.74	0.92	1.96	6.74
8	Y12-40	FI7	3.98	4.35	2.43	1.16	3.77
9	Y12-41	FI6	4.30	15.00	2.27	3.15	5.12
10	Y12-41	FI7	3.70	4.25	3.51	5.50	6.74
11	Y14-39	FI6	12.87	3.55	8.15	3.68	2.16
12	Y14-39	FI7	17.13	5.22	2.89	3.78	5.66
13	Y14-39	FI2	2.60	7.64	38.20	3.59	3.77
14	Y14-39	FI4	2.85	10.33	4.73	7.68	3.17
15	Y14-39	FI6	7.55	4.34	11.53	6.86	6.74
16	Y16-40	FI2	8.55	17.55	5.76	6.39	8.90
17	Y16-40	FI3	4.11	2.93	9.72	9.87	3.24
18	Y16-40	FI4	4.29	3.12	1.57	5.70	7.55
19	Y16-40	FI6	3.34	3.78	2.00	3.47	2.43
20	Y16-42	FI7	0.92	3.36	0.09	0.06	0.77
21	Y16-42	FI12	4.26	2.67	1.78	1.96	4.85
22	Y16-42	FI13	7.50	0.15	2.35	8.30	9.71
23	Y16-44	FI4	5.69	4.78	7.02	3.86	5.39
24	Y16-44	YI1	6.31	1.36	0.55	0.18	2.97
25	Y18-40	FI6	6.48	0.67	0.24	3.13	2.70
26	Y18-40	FI7	9.52	4.26	1.09	2.18	2.97
27	Y18-46	FI2	5.20	0.30	0.16	0.13	3.24
28	Y18-46	FI7	5.10	1.21	2.48	2.43	5.66
29	Y18-46	FI13	4.30	4.69	4.95	4.04	3.77
30	Y18-46	YI5	2.40	1.91	0.43	3.69	2.97

**Table 2. Relative errors of dividing water injection rates**  
**表 2. 劈分水量相对误差表**

	有效厚度法(%)	地层系数法(%)	渗流阻力系数法(%)	劈分系数法(%)
最小值	9.07	5.14	3.89	4.09
最大值	265.22	1369.23	194.70	83.22
平均值	86.77	120.23	65.82	32.65

#### 4. 结果分析

从表 1 中可以看出, 不同方法劈分的结果不尽相同。定义相对误差公式为:

$$\delta = \frac{|\text{计算值} - \text{吸水剖面资料值}|}{\text{吸水剖面资料值}} \times 100\% \quad (7)$$

由此得到四种劈分方法劈分水量相对误差的最小值、最大值和平均值, 如表 2 所示。

通过表 2 分析可以得知, 劈分系数法计算误差平均值最小, 为 32.65%, 且误差最小值和误差最大值也相对较小。由此可见, 劈分系数法的劈分效果最好。因此劈分系数法是 D 井区的合理注水量劈分方法。

#### 5. 结论

1) 劈分系数法综合考虑了地质因素和人为因素, 建立的劈分方程更能符合实际的劈分结果, 劈分精度相对较高。通过计算证明了该方法的计算结果与油田实际相符, 是适合 D 井区的合理分层注水量确定方法, 较好的解决了大井段、多层位的复杂水驱砂岩油藏的注水量劈分问题。

2) 实际油田在进行精细注水劈分时, 应该同时采用多种劈分方法进行对比计算, 优选出适合该油田的合理注水劈分方法。

#### 基金项目

黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521052)。

#### 参考文献 (References)

- [1] 胡熙平, 袁世昌 (2006) 分层注水的油藏适应性分析. *西部探矿工程*, **12**, 87-88.
- [2] 张玉荣, 闫建文, 杨海英, 王海军, 马献斌, 檀为建 (2011) 国内分层注水技术新进展及发展趋势. *石油钻采工艺*, **2**, 102-107.
- [3] 蔡晓梅, 王杰 (2014) 精细注水改善特高含水油藏开发效果研究. *中国石油和化工标准与质量*, **2**, 207.
- [4] Pei, X.H., Yang, Z.P., Ban, L. and Liang, Y.N. (2006) History and actuality of separate layer oil production technologies in Daqing oilfield. 2006 *SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China*, Beijing, 5-7 December 2006, 1-8.
- [5] Ashelm, H. (1988) Maximization of water sweep efficiency by controlling production and injection rates. *SPE European Petroleum Conference*, London, 16-19 October 1988, 1-10.
- [6] 丁阿兰 (2011) 单井产量劈分研究. *科技创新导报*, **12**, 41.
- [7] 郭文英, 胡一华, 唐武 (2010) 水驱油藏产量劈分新方法研究. *内江科技*, **12**, 126.
- [8] 于洪文 (1990) 通过注水井分层注水量计算采油井分层产液(油)量的方法探讨. *石油勘探与开发*, **2**, 47-55.
- [9] 熊听东, 杨建军, 刘坤, 李晓明 (2004) 运用劈分系数法确定注水井单井配注. *断块油气田*, **3**, 56-59.
- [10] 尹洪军, 张俊廷, 张欢欢, 贺怀东 (2012) 应用灰色关联分析方法确定分层注水量公式. *数学的实践与认识*, **13**, 94-99.
- [11] 崔传智, 姜华, 段杰宏, 杨勇, 王建 (2012) 基于层间均衡驱替的分层注水井层间合理配注方法. *油气地质与采收率*, **5**, 94-96.