

# 高含水油田剩余油分布研究方法及应用

魏 斌<sup>1)</sup> 毕研斌<sup>2)</sup> 郑浚茂<sup>2)</sup>

( 1)清华大学工程力学系,北京,100084 2)中国地质大学,北京,100083)

**摘 要** 本文介绍了储层流动单元的概念和分类方法,以及应用储层流动单元研究高含水油田剩余油及其分布的理论基础和基本做法。岩心数据表明,流动单元与剩余油饱和度之间存在着良好的对应关系,基于流动带指标可定量计算剩余油饱和度。不同的沉积微相,其流动单元的组合形式也不同。流动单元的分布可用来表征平面渗流能力的差异和剩余油的分布。分别将以储层流体流动单元研究为核心的一套高含水油田剩余油分布的研究方法和技术,应用于扇三角洲相和河流相储层高含水油田剩余油分布研究中,取得了良好的地质应用效果。

**关键词** 储层流体流动单元 高含水油田 剩余油 分布特征

## The Method for Studying Remaining Oil Distribution in Highly Water-Bearing Oilfield and Its Application

WEI Bin<sup>1)</sup> BI Yanbin<sup>2)</sup> ZHENG Junmao<sup>2)</sup>

( 1) Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084; 2) China University of Geosciences, Beijing, 100083)

**Abstract** Extensive attention has been paid to reservoir evaluation by using the reservoir flow unit since the last period of 1980s. This paper presents not only the concept of reservoir flow unit and its classification method but also the theoretic basis and the main working methods for studying remaining oil distribution properties in the highly water-bearing oilfields by using the reservoir flow unit. Core data show that there is a favorable relationship between residual oil saturation and reservoir flow unit, and the equation for calculating remaining oil saturation is established based on flow zone index ( FZI ). The microfacies is made up of various flow units. The assorted forms of various flow units and the seeping capacity are different among various microfacies. The result shows that flow unit is provided with advantages in describing plane otherness of fluid seeping and in evaluating distribution properties of remaining oil. The method was applied to two oilfields whose sedimentary environment is fan delta facies and fluvial facies respectively. Obvious geological effects have been obtained.

**Key words** reservoir flow unit highly water-bearing oilfield remaining oil distribution properties

确定储层中剩余油的分布仍然是石油工业迄今尚未完善解决的重大课题。中国近 90% 油田均采用注水开发方式,注水开发基本规律是注水开发早、中期含水上升快、采出程度低,使得相当多的可采储量要在高含水期采出(魏斌等,2002a)。因此,认清高含水期剩余油分布特征,是十分迫切和亟待解决的重大问题。

国内外剩余油研究方法包括:开发地质学方法、剩余油分布监测技术和动态方法。其中,开发地质学方法主要研究微构造、沉积微相、储层非均质性以及利用密闭取心资料计算剩余油饱和度。剩余油监

测技术主要是裸眼井和套管井测井技术以及单井示踪剂、井间示踪剂等。动态方法中,水驱物模和微观物模法可用来预测区块规律;而水驱特征曲线法和物质平衡法能提供区块平均饱和度值(魏斌等,2002a)。

综合国内外剩余油研究技术和发展现状,笔者基于层序地层学、储层地质学、测井学等理论和方法,提出一套以储层流体流动单元研究为核心的高含水油田剩余油分布研究方法和技术。该方法首先应用高分辨率层序地层学,建立等时剖面格架,明确地层演化过程中的沉积演化规律;通过岩心刻度测

井,建立测井储层物性参数解释模型,进行流体流动单元的划分和评价。然后,通过岩电相驱实验和测井综合分析,建立剩余油饱和度计算模型。最后,建立储层砂体骨架模型和物性参数(孔隙度、渗透率)以及剩余油饱和度模型,并进行剩余油分布的预测。方法分别应用于扇三角洲相和河流相储层高含水油田剩余油分布研究中,取得了良好的地质应用效果。

本文着重介绍储层流动单元与剩余油及其分布的关系。

## 1 储层流动单元分析

### 1.1 储层流动单元概念及分类方法

储层流动单元是指影响流体流动的岩性和岩石物理性质在内部相似的、垂向上和横向上连续的储集带。而影响流体流动的参数主要是孔喉几何分布特征。因此,应用孔隙几何学,从反映岩石孔隙结构特征的参数着手,进行流动单元的研究。孔隙几何学的理论基础是平均水力半径的概念及 Kozeny-Carman 的孔渗关系公式(Jian 等,1994;Maghsood 等,1996;Amaefule 等,1993;Canas 等,1994;Davies 等,1996a,1996b;Ebanks 等,1987)。由 Kozeny-Carman 公式可导出:

$$\lg(RQI) = \lg(\phi_z) + \lg(FZI)$$

式中, $RQI$ 为储层品质指数,单位为 $\mu\text{m}$ ,表征储层渗流能力的大小,其值越大,储层渗流能力越强; $\phi_z$ 是孔隙体积与颗粒体积之比; $FZI$ 为流动带指标,单位为 $\mu\text{m}$ ,反映岩石孔隙结构特征。基于 $FZI$ 值即可划分流动单元的类型(Maghsood 等,1996;Wei Bin 等,2001)。具有相似 $FZI$ 的岩石被认为具有相似平均水力半径,因而属于同一水力流动单元。

由于岩心分析中存在随机测量误差,导致 $FZI$ 围绕其真实均值有一个分布。如果存在多个流动单元,总的 $FZI$ 分布函数就是单个流动单元分布函数的叠加。故采用概率统计法划分流动单元类型。在正态概率纸上,正态分布函数的图象为一直线。不同的流动单元,由于具有不同的概率分布函数,故在正态概率纸上表现为具有不同斜率的直线段(图1)。

可按3个步骤划分储层流动单元的类型:①由岩心分析数据计算 $FZI$ 、 $RQI$ 等参数;②计算 $FZI$ 的概率累积曲线并画在概率格纸上;③具有不同斜率直线段的个数即为流动单元类型的数目,线段的端点所对应的 $FZI$ 值即是不同流动单元的分界点。

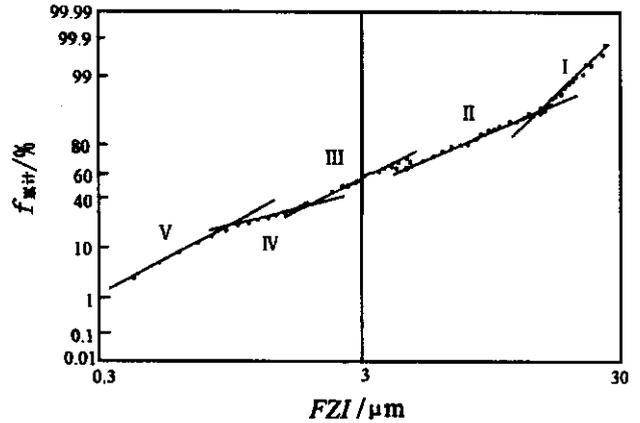


图1  $FZI$  概率图

Fig.1 The probability map of  $FZI$

随后,通过岩心刻度测井的方法,建立利用测井资料计算流动带指标的方程,在未取心井利用测井资料计算流动单元的相关参数。

### 1.2 计算剩余油饱和度

根据储层流动单元水驱实验的结果(魏斌等,2002b)和高含水密闭取心井资料,证明剩余油饱和度是流动单元流动带指标 $FZI$ 的函数(Wei Bin 等,2000)。动态密闭检查井的岩心分析资料(图2)表明随 $FZI$ 的增大,剩余油饱和度亦增大。而当 $FZI$ 增到一定程度后,随 $FZI$ 增大,剩余油饱和度有所降低。图中虚线为原始油饱和度随 $FZI$ 变化的趋势线,比较剩余油饱和度变化规律可见, $FZI$ 值越高,则原始油饱和度与剩余油饱和度的差别越大,相应的油层动用程度越高,同时剩余油饱和度仍然较高。据此建立利用流动带指标计算剩余油饱和度的方程。

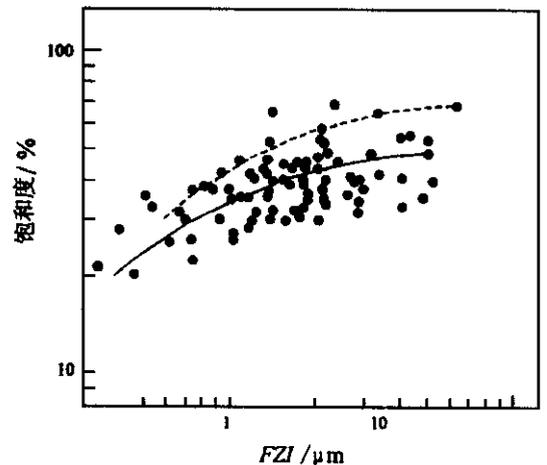


图2 岩心分析 $FZI$ 与剩余油饱和度关系图

Fig.2 Relationship map of core  $FZI$  and residual oil saturation

### 1.3 剩余油分布研究

研究表明,沉积微相与流动单元具有良好的对应关系,即一类沉积微相系由2~3类流动单元组合而成,不同类型的沉积微相,其组合的流动单元类型亦不相同(Wei Bin等,2000)。从而为利用流动单元研究剩余油分布奠定了地质基础。

在充分认识工区地质特征的前提下,以测井逐点数据资料为数据基础的储层地质建模技术,被用来研究井间储层参数和剩余油饱和度在剖面和平面上的展布特征。这样,由单井点到井间,即可认识和掌握工区剩余油分布特征,进而进行剩余油有利区域的预测。

## 2 应用实例

将该方法分别应用于辽河油田欢26断块和大

庆萨尔图油田北三区东部西块,实践证明应用效果良好。

### 2.1 辽河欢26断块

欢26断块位于辽河断陷盆地西部斜坡的南段,断块由南北2条断层夹持而成,呈NNE向的长方形展布,含油面积9.1 km<sup>2</sup>。至1998年10月,综合含水率达到76.1%,采出程度为31.52%,产量的自然递减率为14.86%。

在欢26断块兴隆台油层6口取心井585个孔隙度、渗透率分析数据的基础上,将储层划分为5类流动单元(Wei Bin等,2000;表1,图1)。水下分流河道微相上部属III类流动单元,下部为I、II类流动单元;河口坝微相上部为III类流动单元,下部属V类流动单元。

利用建立的剩余油饱和度计算方程,用数字处

表1 欢26块兴隆台油层流动单元划分统计表

Table 1 Division table of flow units of Xinglongtai reservoir in block Huan26

流动单元	样品数/个	FZI/ $\mu\text{m}$	$\Phi/\%$	$K/\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	岩性
I	32	$\geq 14$	16.1~29.6(23.2)	13~1885(7194.5)	砾状砂岩、砂砾岩、砾岩
II	118	[5,14]	15~29.3(23.1)	13~771(1551.1)	含砾不等粒砂岩、砾状砂岩
III	187	[1.7,5]	9.6~32.3(23.8)	8~106(246)	不等粒砂岩、中细粒砂岩
IV	68	[1,1.7]	11.7~29.4(22.2)	3~12(40.3)	细砂岩、含泥不等粒砂岩
V	109	<1	10.8~27.3(20.7)	1~24(6.93)	含泥细粉砂岩、粉细砂岩

注:圆括弧中的数据为算术平均值; $\Phi$ 为孔隙度; $K$ 为渗透率。

理本区100余口井的测井数据,取得了各井各小层剩余油饱和度值。应用储层地质建模技术,研究井间储层参数和剩余油饱和度在剖面和平面上的展布特征。

通过研究,确定欢26断块剩余油在平面上主要分布在中部和东部的构造较高部位。主要富集区域为远离注水井地区和注采井组之间的二线地区,构造高部位或局部构造高点处和注采井网不完善地区以及岩性尖灭体附近地区等呈零星状或局部小面积片状和零星点状分布。

在该认识的指导下,在预测的剩余油富集区域钻开欢2-13-216侧钻井,初期获日产油32 t,含水3.0%。仅半年时间该井累计采油1906 t。欢26断块1998~1999年所钻的15口侧钻井均位于所预测的剩余油分布的高值区内。

根据高含水期剩余油分布研究成果提出建议的4口调整井,截止到2001年7月,已经累计增产原油24886 t。

### 2.2 大庆萨尔图油田北三区东部西块

研究的工区为萨尔图油田北三区东部西块,面

积约7.7 km<sup>2</sup>。截至2001年12月,基础井网老井平均单井日产液115.7 m<sup>3</sup>/d,日产油7.6 t/d,综合含水95.1%,聚驱新投井平均单井日产液95.6 m<sup>3</sup>/d,日产油10.3 t/d,综合含水89.2%。目的层(PI组和PII<sub>1-3</sub>油层)为松辽盆地北部萨东沉积体系的早白垩世沉积产物,主要为水上分流平原的河流沉积,部分属于三角洲内前缘相沉积。

该区储层亦可被划分为5类流动单元(表2)。

根据对该区不同沉积类型油层的精细地质解剖,应用剩余油分布方法研究表明,不同沉积类型的油层剩余油分布类型各不相同,主要分布规律有以下几种表现形式:

(1)小型分流河道砂剩余油较为富集。如PI<sub>1</sub>小层北2-21-P55、21-P59、20-P59等井均位于小型分流河道中,砂体分布相对较为孤立,受注水井影响较小,故剩余油饱和度较高,均在50%以上。其中,2-21-P55产油16 t/d,水31 m<sup>3</sup>/d,含水率55%;21-P59井产油33 t/d,水29 m<sup>3</sup>/d,含水率43%;20-P59井产油51 t/d,水71 m<sup>3</sup>/d,含水率50%。

表 2 油层流动单元划分统计表

Table 2 Division table of flow units

流动单元	样品数/个	$FZI/\mu\text{m}$	$\Phi/\%$	$K/\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	岩性
I	18	$\geq 6.42$	18~31.2(28.02)	733~3268(2309.7)	含粉砂中砂质细砂岩、含粉砂和中砂细砂岩
II	37	[4.15 6.42]	21.2~30.8(28.82)	492~1996(1254)	含粉砂和中砂细砂岩、含粉砂中砂质细砂岩
III	64	[1.3 4.15]	17.3~31.8(26.76)	34~1138(284.1)	不等粒砂岩、含泥细砂质粉砂岩、粉砂质细砂岩
IV	39	[0.4 1.3]	18.7~28.6(23.45)	3~68(19.9)	含泥细砂粉砂岩
V	11	$< 0.4$	18.9~25.6(22.4)	1~4(1.91)	泥质粉砂岩

注 注释同表 1。

(2) 二线受效井剩余油较为富集。如  $PI_1$  小层北 2-20-P52、20-P53、21-P50、21-检 P51、21-P52 等井处在北 2-1-65、1-67 等基础井网采油井的二线受效部位, 因基础井网采油井的截流作用而形成较为富集的剩余油, 其饱和度均在 50% 以上。

(3) 原井网控制程度较低的井区剩余油饱和度较高。如  $PI_2$  小层北 2-20-P59 井, 位于北 2-3-69 注水井与北 2-1-76 采油井、北 2-3-73 注水井与北 2-1-77 采油井这两个来水主方向之间, 剩余油较多, 而位于这两条来水主方向上的北 2-20-P58、20-P60 井水淹较为严重。又如  $PI_7$  小层北 3-丁 5-P55、丁 5-P57、丁 6-P53、丁 6-P55 等井, 也未在主要来水方向上, 因而剩余油较为富集。

(4) 厚油层仍然有较为富集的剩余油。这一点也为岩心分析数据所证实。

### 2.3 剩余油分布影响因素

剩余油分布受沉积微相及其展布特征和注采井网两方面因素的控制, 其中沉积微相为形成剩余油的先决条件, 开采条件是决定剩余油分布状况的外部因素。其中, 沉积微相包括沉积相带及其岩性、物性、非均质性和砂体分布形态, 开采条件即指注采系统及其完善程度。欢 26 断块和大庆萨尔图油田北三区东部西块的剩余油分布亦不例外地受这些因素的影响。

欢 26 断块剩余油分布还表现为受构造因素影响较大。构造高部位及局部构造高点在油水运动中起到了油水分离作用, 使油在构造高部位或局部构造高点形成富集区。如东部高点 9-220 井附近含油饱和度仍在 60% 以上。而大庆萨尔图油田北三区东部西块的剩余油则表现为与构造位置的高低无关。

## 3 结论

(1) 高含水油田剩余油分布研究的实践表明, 该方法行之有效, 分别在扇三角洲相和河流相储

层取得了良好的地质应用效果。

(2) 高含水期剩余油分布研究是一项系统工程, 需要相关部门密切配合和协作。此项研究中所采取的做法是积极向油田决策部门提交研究成果, 为开发方案的制定和调整井的部署提供可靠的依据。调整井完井之后在第一时间将综合解释结果和试采油建议提供给决策部门。实践证明效果良好。

### 参考文献

- 魏斌, 郑浚茂编著. 2002a. 高含水油田剩余油分布研究. 北京: 地质出版社.
- 魏斌, 张友生, 杨贵凯, 徐磊. 2002b. 储层流动单元水驱油实验研究. 石油勘探与开发, 29(6): 72~74.
- Jian F X, Chork C Y, Taggart I J et al. 1994. A genetic approach to the prediction of petrophysical properties. Journal of Petroleum Geology, 17(1): 71~88.
- Maghsood Abbaszadeh, Hikari Fujii, Fujio Fujimoto. 1996. Permeability prediction by hydraulic flow units-theory and applications. SPE Formation Evaluation, December, 263~271.
- Amaefule J O, Mehmet A, Djebbar T. 1993. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. Formation Evaluation and Reservoir Geology Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 205~220.
- Canas J A, Malik E A. 1994. Characterization of flow units in sandstone reservoirs: La Cira field, Colombia, South America. Proceedings of the Permian Basin Oil & Gas Recovery Conference. SPE, Richardson, TX, USA, 883~892.
- Davies D K, Vessell R K. 1996a. Flow unit characterization of a shallow shelf carbonate reservoir: North Robertson unit, West Texas. Proceedings-SPE Symposium on Improved Oil Recovery. SPE, Richardson, TX, USA, 295~304.
- Davies D K, Vessell R K, Bernal G M C. 1996b. Flow unit modeling in complex reservoirs. AAPG Annual Convention, San Diego, CA, USA, 5336.
- Ebanks W J Jr. 1987. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects. AAPG Annual Meeting, 71(5): 551~552.
- Wei Bin, Chen Jianwen, Zheng Jumao et al. 2000. Utilization of reservoir flow unit to study remaining oil distribution in high water containing oilfield. Earth Science Frontiers, 7(4): 403~410.