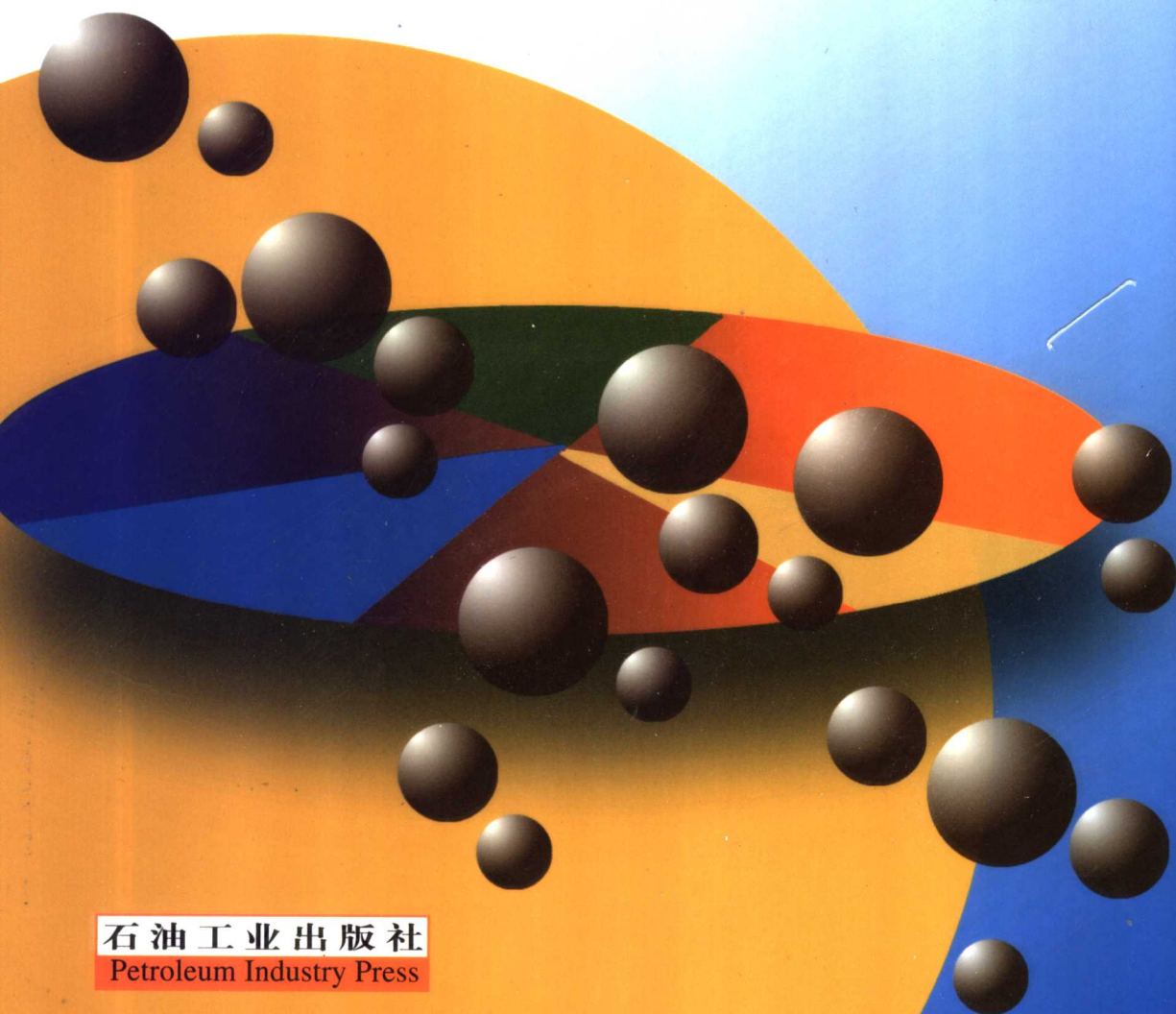


SHENGYUYOU FENBU YANJIU FANGFA

剩余油分布 研究方法

郭 平 冉新权 徐艳梅 黄伟岗 等编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

剩余油分布研究方法

郭 平 冉新权 徐艳梅 黄伟岗 等编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讲述了剩余油分布研究的目的、意义及现状,分析了剩余油分布的影响因素、分布特征、室内实验技术、工艺技术、以及现场应用实例等方面的内容。

本书可供油气田开发专业的科研人员、现场技术人员及管理人员参考,同时也可作为相关院校石油工程专业学生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

剩余油分布研究方法/郭平等编.

北京:石油工业出版社,2004.12

ISBN 7-5021-4849-3

I. 剩…

II. 郭…

III. 残余油饱和度-研究方法

IV. TE327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 116576 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.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

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: 7.75

字数: 198 千字 印数: 1—1500 册

定价: 26.00 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

经过几十年的开发,我国大多数油田都已进入高含水、高采出程度阶段,因此,及时、准确地研究剩余油的分布显得迫切而重要。目前,剩余油分布的研究已成为一项世界性的课题,也仍然是石油上游工业迄今尚未得到完善解决的重大难题。

剩余油分布的研究已成为世界石油研究的热点,近年来由于注气工程的需要,我们有幸接触剩余油分布的研究工作。研究和调研发现,发表的相关论文很多,但系统综合阐述各种研究方法的著作较少,本书以精选出的 120 多篇论著为主要参考资料,应用了多学科理论和方法,并与计算机和数值模拟技术相结合,综合分析了剩余油分布的特征、影响因素,并且运用地质、油藏工程、试井、数值模拟、测井等方法及手段研究剩余油分布,在明确剩余油分布的基础上进行剩余油的开发,从而为提高石油采收率提供参考。

本书共分为七章,第一章讲述了剩余油研究的目的、意义及研究现状。第二章论述了剩余油分布的影响因素(包括地质和开发两个方面)、剩余油的分布特征,还特别提出了稠油油藏剩余油分布的影响因素。第三章从地质入手,研究剩余油的分布,应用微型构造、沉积微相、储层流动单元等研究剩余油的分布规律。第四章应用了物质平衡、无量纲注采曲线法等油藏工程方法以及试井、数值模拟进行剩余油分布的研究。第五章讲述了室内实验技术在剩余油研究中的应用,包括了岩石物理相、超导重力测试、电阻率勘探方法、核磁共振成像技术、岩心分析等。第六章是剩余油研究的工艺技术,剩余油饱和度的研究主要运用测井、示踪剂、井下重力仪等方法,以及国外运用的强化扩散等方法。第七章是现场应用实例,包括了地质方法、油藏工程方法、室内实验及工艺技术等方法在油田中的实验应用情况。第八章是对剩余油开发及提高采收率的几点建议。

第一、四、五章由郭平编写,第七、八章由冉新权编写,第二、六章由徐艳梅编写,第三章由黄伟岗编写。

参与本书编写的还有夏海容、杨学峰、汪周华。在本书编写过程中得到了杜志敏、李士伦、孙良田教授的悉心指导,在此表示衷心感谢。

由于笔者水平有限,书中不妥之处,敬请专家同行批评指正。

作 者

2004 年 6 月 30 日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 剩余油研究的目的及意义	(1)
1.2 剩余油研究的发展状况	(2)
1.2.1 微规模	(2)
1.2.2 小规模	(2)
1.2.3 大规模	(3)
1.2.4 宏规模	(3)
2 剩余油分布特征	(5)
2.1 影响剩余油分布的地质因素	(5)
2.1.1 沉积微相	(5)
2.1.2 沉积单元	(6)
2.1.3 沉积韵律	(6)
2.1.4 渗透率差异	(6)
2.1.5 非均质性	(6)
2.1.6 储层孔隙结构	(7)
2.1.7 夹层	(7)
2.1.8 裂缝	(7)
2.1.9 微结构和封闭断层	(8)
2.2 影响剩余油分布的开发因素	(8)
2.2.1 井网影响	(8)
2.2.2 其他影响因素	(8)
2.3 稠油油藏剩余油分布的影响因素	(10)
2.3.1 非均质性影响	(10)
2.3.2 开发井网的影响	(10)
2.3.3 汽窜因素	(10)
2.3.4 蒸汽吞吐开采方式对剩余油分布的影响	(10)
2.3.5 射孔井段的影响	(10)
2.4 剩余油的分布特征	(11)
2.4.1 国内外对剩余油分布的研究	(11)
2.4.2 剩余油的平面分布特征	(12)
2.4.3 剩余油层间分布	(12)
2.4.4 剩余油层内分布	(12)
2.5 剩余油的成因类型	(13)
2.5.1 平面剩余油成因类型	(13)
2.5.2 垂向剩余油成因类型	(13)

3 研究剩余油的地质方法	(14)
3.1 应用微型构造研究剩余油	(14)
3.1.1 微型构造影响油井生产和剩余油分布的理论依据	(15)
3.1.2 微型构造形成剩余油的水动力原因	(17)
3.2 砂层沉积微相对剩余油分布的影响	(18)
3.2.1 沉积微相的划分	(18)
3.2.2 剩余油分布规律的研究	(19)
3.3 应用储层流动单元研究剩余油分布	(21)
3.3.1 储层流动单元概念	(21)
3.3.2 剩余油饱和度计算	(22)
3.3.3 剩余油分布	(22)
3.4 根据层序地层学进行剩余油分布预测	(23)
3.4.1 高分辨率层序地层格架的建立	(23)
3.4.2 依据基准面变化预测储集层非均质特性	(23)
3.4.3 依据精细储集层格架划分流体流动单元	(24)
3.5 碳酸盐岩潜山油藏古地貌及剩余油分布关系	(24)
3.5.1 受潜山古地貌控制的剩余油类型	(24)
3.5.2 潜山内幕构造控制的剩余油类型	(25)
3.5.3 储层裂缝的分布	(25)
3.5.4 孔喉的配置关系	(25)
3.6 非均质油藏剩余油分布规律研究	(25)
3.6.1 影响剩余油分布的因素分析	(25)
3.6.2 剩余油分布类型	(26)
3.7 用地质储量丰度定量描述剩余油的分布	(26)
3.7.1 基本原理	(26)
3.7.2 该方法的优点	(27)
3.8 河流相储集层中剩余油类型和分布规律	(27)
3.8.1 河流相油藏剩余油类型及丰度	(27)
3.8.2 剩余油分布规律	(28)
3.9 动态分析法研究剩余油	(29)
3.9.1 资料的收集	(29)
3.9.2 资料的筛选和应用	(30)
3.9.3 绘制小层剩余油分布图	(30)
4 油藏工程、试井及数值模拟方法	(31)
4.1 油藏工程方法	(31)
4.1.1 物质平衡法	(31)
4.1.2 无量纲注入—采出法	(32)
4.2 水驱油藏剩余油分布研究方法	(33)
4.2.1 现代试井分析方法	(33)
4.2.2 渗饱-水驱曲线法	(39)

4.2.3	水驱特征曲线法	(40)
4.2.4	水线推进速度法	(40)
4.3	数值模拟在剩余油研究中的应用	(42)
4.3.1	选取数值模型	(42)
4.3.2	建立模型	(42)
4.3.3	准备数据	(42)
4.3.4	历史拟合	(43)
4.3.5	剩余油分布模型	(43)
4.3.6	油藏数值模拟发展方向	(43)
5	室内实验技术在剩余油研究中的应用	(45)
5.1	岩石物理相	(45)
5.2	超导重力测试	(45)
5.3	电阻率勘探方法	(46)
5.4	核磁共振成像技术	(47)
5.5	岩心分析	(47)
5.5.1	取心方式	(47)
5.5.2	确定剩余油饱和度的方法	(51)
5.6	微观渗流模拟技术	(53)
5.7	CT 扫描和神经网络技术	(53)
5.7.1	CT 扫描的规则	(54)
5.7.2	饱和度的确定	(55)
5.7.3	神经网络	(56)
5.7.4	实验研究	(56)
5.8	模糊评价方法在剩余油分布研究中的应用	(56)
5.8.1	模糊综合评价方法	(57)
5.8.2	神经网络结构识别技术	(57)
6	剩余油分布研究工艺技术	(59)
6.1	测井技术在剩余油研究中的应用	(59)
6.1.1	裸眼井测井方法	(59)
6.1.2	套管井测井	(65)
6.1.3	稠油层的测井系列	(76)
6.2	化学示踪剂在确定剩余油饱和度中的应用	(76)
6.2.1	示踪剂的发展概况	(76)
6.2.2	示踪剂测试的理论依据	(77)
6.2.3	单井化学示踪剂测试	(78)
6.2.4	井间示踪剂测试	(82)
6.2.5	分配性示踪剂在一般情况下的应用	(84)
6.3	用强化扩散的方法确定剩余油饱和度	(86)
6.3.1	强化扩散方法原理	(86)
6.3.2	数据处理及解释	(87)

6.4	用井下重力仪 (BHGM) 确定剩余油饱和度	(87)
6.4.1	BHGM 的测量方法	(87)
6.4.2	用 BHGM 确定剩余油饱和度	(88)
6.5	钻井技术在剩余油研究中的应用	(89)
6.5.1	侧钻水平井是开发成熟油田“大尺度”未波及剩余油主要富集区的主要方法	(90)
6.5.2	侧钻水平井可以钻达油层中任何部位的未波及剩余油富集区	(90)
6.5.3	侧钻水平井比钻垂直井和常规水平井的费用低得多、更为经济	(91)
6.5.4	侧钻水平井开采正韵律油层顶部剩余油的可行性评价	(91)
6.6	各种测定方法的对比与评价	(92)
7	现场应用实例	(94)
7.1	地质方法描述剩余油分布	(94)
7.1.1	微型构造和沉积微相研究剩余油分布	(94)
7.1.2	非均质油藏剩余油分布规律研究	(97)
7.1.3	地质储量丰度在剩余油研究中的应用	(99)
7.2	油藏工程方法研究剩余油分布	(100)
7.2.1	水驱特征曲线法	(100)
7.2.2	产量衰减曲线法	(100)
7.2.3	计算文 136 块沙二下油藏各小层剩余油饱和度	(100)
7.3	室内实验技术在剩余油研究中的应用	(101)
7.3.1	储层分类及评价标准的建立	(102)
7.3.2	储层评价	(103)
7.4	工艺技术在剩余油研究中的应用	(103)
7.4.1	核磁共振测井技术的应用	(103)
7.4.2	化学示踪剂的应用	(104)
8	提高剩余油采收率的方法研究	(108)
8.1	提高剩余油采收率的方法	(108)
8.1.1	优化注采井网	(108)
8.1.2	加强注采结构调整, 改善层内注采状况	(108)
8.1.3	搞好注水调配, 加强平面调整	(108)
8.1.4	对边底水构造油藏, 利用水平井技术可以挖潜剩余油	(108)
8.1.5	也可以考虑用聚合物驱替和水力压裂方法挖潜剩余油	(108)
8.2	剩余油研究的几点建议	(108)
	参考文献	(110)

1 绪论

20 世纪,我国石油工业经历了 50 年代恢复和探索、60~70 年代高速发展和 80 年代以后稳定发展的三大历史阶段。在艰苦的探索历程中取得了一定的成果,石油方面:发现 576 个油田,探明石油地质储量 $225.6 \times 10^8 \text{ t}$,可采储量 $63.4 \times 10^8 \text{ t}$ 。天然气方面:发现 193 个气田,探明天然气地质储量 $4.4937 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中气层气 $3.3727 \times 10^{12} \text{ m}^3$,溶解气 $1.121 \times 10^{12} \text{ m}^3$;天然气可采储量 $2.5704 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中气层气 $2.2002 \times 10^{12} \text{ m}^3$,溶解气 $3702 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。尽管如此,我国石油天然气工业仍面临着严峻的挑战:我国剩余可采储量资源量为 $150 \times 10^8 \text{ t}$,人均资源量 12t/人,而世界人均资源量 68t/人,仅占世界的 1/5 强;人均探明地质储量 4.8t/人,仅占世界的 1/10;人均可采储量 1.9t/人,仅占世界的 1/12。而且各大油田呈现含水率上升、平均含水率 84.2% 的特点。大庆油田 $5000 \times 10^4 \text{ t}$ 以上产量稳定了 27 年,2003 年起开始递减,今后每年降 $(150 \sim 200) \times 10^4 \text{ t}$ 。从 1993 年起我国石油进口量大于出口量,2002 年进口量 $7185 \times 10^4 \text{ t}$,已占全国消费量的 30%,花费外汇 142×10^8 美元。在当前严峻的经济条件下,在石油天然气供求矛盾日渐突出的情况下,研究剩余油的分布规律,认识和开发油田剩余油,使已开发油田增加产量,提高石油天然气的采收率是当务之急。

1.1 剩余油研究的目的及意义

剩余油一般认为是通过加深对地下地质体的认识和改善开采工艺水平等措施可以采出的油。狭义上它与残余油不同,残余油是指未被采出的油气,因此剩余油是残余油的一部分。在广义的情况下剩余油与残余油相同。

剩余油研究是各石油生产国颇为重视的一项世界性的研究课题,已经成为国际石油学术界急于攻关的难题之一。

在剩余油研究中,未波及剩余油占有很大的比重。如就未波及剩余油而言,这部分剩余油的数量是十分巨大的。根据我国 25 个重要注水砂岩油田的统计,到开发结束时,未波及系数将为 0.307;我国能用常规注水进一步挖潜的未波及可动油占动用地质储量的 14.8%,用常规注水方法采不出来的未波及不可动油占 13.3%,两者合计达到 28.1%,比例相当高。

很明显可以看到:剩余油储量占可动用储量的比例是很高的,而且国内一些油田在进入中、高含水期后,这部分剩余油将是油田开发的重点和挖潜的主要方向。

通常,一个油藏经过一次和二次采油后,还有相当数量的石油仍然存留在油藏中成为残存油。剩余油是指开采到目前为止,还残留在地下的可采储量,在数值上等于可采储量与累积采油量之差。它是在目前的工艺技术措施下能采出的油,但由于开发方式,开发策略或开发方案的不当而仍剩余在地下的油。

在油田进行长期注水开发后,我国大多数油田现在已经进入高、特高含水开发阶段,目前平均综合含水已超过 80%,原油产量成明显的递减趋势,采收率仅为 30% 左右,但油藏内仍然有 50% 的可采储量,这部分油就是我们要研究的剩余油。这些残留在地下的剩余石油储量对于增加可采储量和提高采收率是一个巨大的潜力。据估计,如果世界上所有油田的

采收率提高 1%，就相当于增加全世界 2~3 年的石油消费量，因此，加强剩余油分布规律的研究、提高石油采收率一直是油田开发地质工作者和油藏工程师研究的主题。

1.2 剩余油研究的发展状况

从 20 世纪 80 年代开始，研究剩余油分布、提高采收率问题已引起世界各石油生产国的普遍关注。经多年的研究，剩余油饱和度测定方法及技术得到了很大的发展和改进。在钻进取心方面，除了普通取心外，还有采用海绵取心、保持压力取心等；在开发测井方面，除了提高常规测井技术外，还补充了碳氧比测井、介电测井、核磁测井，并结合采用注一测一注技术、时间推移技术等。国内开展对剩余油研究的油田很多，它们分别从不同方面进行了剩余油研究，特别是一些很早就进入高含水期的油田，如中原油田、河南油田、辽河油田、胜利油田等很早就对剩余油开始了研究，但这些研究只是针对特定的地质条件、油藏特点，对具体地质特点的油藏进行剩余油的分布研究、剩余油饱和度方法确定和利用一些简单的开采方法进行剩余油挖潜等，并没有进行详细比较、归纳和概括。另外，我国许多油田对单井示踪剂方法进行了研究和实验，并在实际生产中得到了应用。中国石油勘探开发研究院、华北油田分公司等单位还开展了利用油水井注、采剖面测井资料求油层剩余油饱和度的研究。所有这些方法和技术为人们提供了较为准确的剩余油饱和度的估计，但是他们提高的都是井点周围局部范围内的平均剩余油饱和度，而未能反映出剩余油在井间或整个油藏的分布情况。俞启泰同志所提出的剩余油理论是目前最为详细、最为完整、最为精练的方法，他提出了剩余油分布的“不同规模”概念，针对不同规模的剩余油进行不同的剩余油分布研究，并且总结了不同规模的剩余油确定方法和饱和度确定方法；同时，他提出了一整套用于确定我国注水多层砂岩油藏的“波及评价系统”，利用该系统计算确定了“大尺度”未波及剩余油的三大富集区。

在对剩余油进行研究前，有必要介绍一下剩余油研究的规模。因为不同规模的剩余油，其包含的内容和研究方法都有很大的不同。因此，需要研究剩余油在不同地质规模存在的空间位置、形态、数量、甚至随时间的变化。剩余油研究的地质规模，就是油藏描述的不同“体积规模”（见图 1-1）。

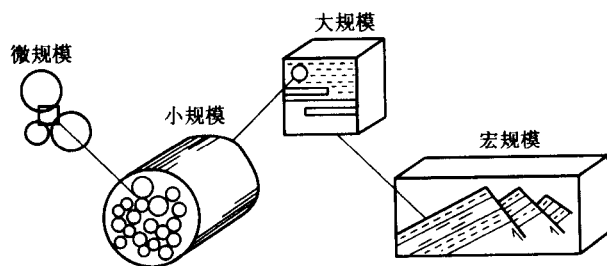


图 1-1 与多孔介质平均体积相联系的油藏描述规模图（俞启泰，1997）

1.2.1 微规模

油藏描述包括颗粒的研究、孔隙尺寸的分布、孔壁的粗糙度、充填的结构、孔喉的粘土衬、孔隙类型、矿物学、胶结影响以及在扫描电镜和薄片中可以识别的其他特点。目的主要是研究剩余油在孔隙内部的分布、数量和性质。研究的重要方法是扫描电镜、薄片、光刻微物理模型、原油性质分析。

1.2.2 小规模

这是与典型的岩心有关的规模。在这个规模上，通常确定油藏岩石特性：孔隙度、渗透率、分散性、压缩性、相对渗透率、毛细管力与饱和度关系。它所代表的非均质性在每口井

中随位置和方向变化很大。用“微规模”资料通常很难预测“小规模”的动态。在这一规模上，剩余油研究的内容主要是饱和度，方法主要是实验室中的各种岩心试验，包括驱替试验和饱和度测量等。

1.2.3 大规模

这是烃体积计算和数值模拟研究的规模，包括计算网格中的单元（一个连续的地质范围中离散化的形式）。在这个规模上，描述水力单元和流体流动主要的障碍是建立单元的油藏的大小、形状、方向、空间的布局和划分的间隔。在这一规模上，要研究剩余油分布状况和平均含油饱和度。一些油藏工程测量，如压力测试、示踪剂测试、测井研究，大致是这个规模的结果，表示了这个规模中的平均状况。

用“小规模”平均表示“大规模”的值的难度，与从“微规模”变为“小规模”的难度相仿。

1.2.4 宏规模

这基本上是油藏规模。研究的是油藏级规模的平均，如物质平衡等方法研究的结果。

显然，剩余油研究的目标应和不同级别的规模相对应。例如：岩心测量的饱和度、测井方法解释的饱和度、物质平衡法计算的饱和度，它们的意义不同，不能互相取代。

目前国内外有关剩余油分布研究的重点主要集中在以下三个方面：（1）对剩余油分布的描述；（2）对剩余油饱和度的测量与监测技术的研究；（3）对剩余油挖潜技术的研究。

目前剩余油的研究方法主要有宏观和微观分布以及剩余油饱和度的研究（如图 1-2 所示）。

从大庆、辽河、胜利等主要油田的研究来看，我国的剩余油研究已经达到了一定的高度。

（1）我国研究剩余油分布的手段已经基本具备，同美国、前苏联等主要产油国的水平相差不是很远。

（2）大庆油田的精细地质描述和辽河油田的小层沉积分析比较成熟。国外也不外乎这类方法。

（3）油田开发地质研究已经有小层分析细分到单砂体分析，提高了油层沉积相分析的精度。

（4）地质研究已由单学科研究发展到包括生产动态资料在内的多学科综合研究。

（5）对密闭取心比较重视，密闭取心分析为剩余油研究提供了开采状况的第一手资料。

（6）大庆油田的动态监测系统

比较完善。他们有 80% 的注水井每年测吸水剖面一次，自喷采油井 90% 的井点每年测产液剖面一次，机械采油井也有 50% 的井点每年分层测试一次。

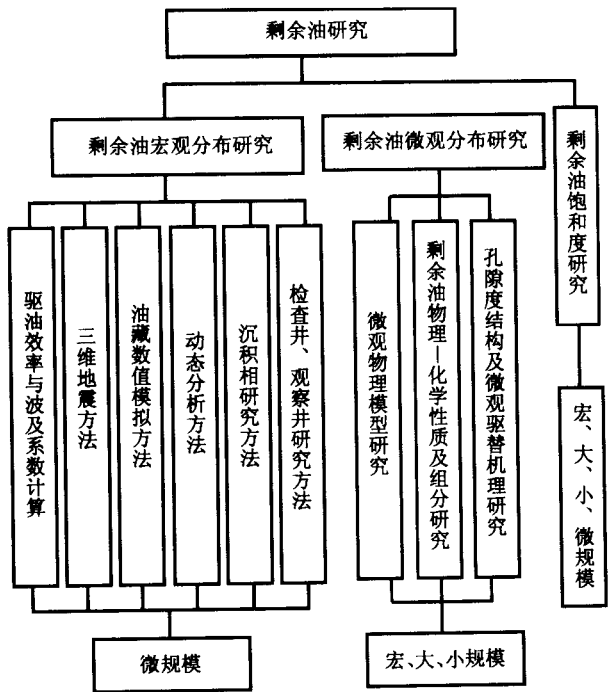


图 1-2 剩余油研究方法及其内容结构图

虽然我国对剩余油的研究已经具备一定的实力，但同国外相比，在许多方面还有一定的差距：

- (1) 资料采集过于简单化，尤其是动态长期监测还有待于加强。
- (2) 用露头研究储层非均质性同国外相差较远。
- (3) 储层非均质性研究侧重于静态研究，而往往忽视动态资料的利用。
- (4) 油田开发调整阶段的剩余油分布不是很清楚。
- (5) 定向取心资料的应用比较薄弱。
- (6) 地层倾角测量研究单砂体的产状和分布需加强和提高。

2 剩余油分布特征

2.1 影响剩余油分布的地质因素

影响剩余油分布的因素很多,通常划分为两类:地质因素和开发因素。地质因素主要包括有:油藏非均质性、构造、断层等。开发因素主要包括有:注采系统的完善程度、注采关系和井网布井、生产动态等。受生产动态因素影响的剩余油富集区有:注水分流区;注水二线区;生产井网稀,单井控制储量大的井区。这些井区多为高产区,但受人为因素影响大,情况经常发生变化。例如由于新注水井投注,原有水线发生变化,分流区可变为主流区,二线区也可变为一线区;新的加密井投产,稀井网变为密井网,单井控制储量由大变小。故这类井区的井高产时间不易持久。另外,上述是假定油层为一平面均质体,而实际所有油层都是起伏不平和非均质的,故实际地下情况远比设想的复杂得多,有时甚至与设想相反。前者属于内因,后者属于外因。它们的综合作用就导致了目前剩余油分布的多样化。

受地质因素影响的剩余油富集区主要涉及油层自身和构造两方面:断层及油层边角地带的滞留区;构造高部位及正向微型构造区;储集砂体核心部位,油层厚度大、物性好的地区。由于地质因素在开发过程的短暂时间内不会发生变化或变化甚微,受人为影响小,成为影响剩余油分布的主要因素,受其影响的加密井,常能保持高产稳产。

2.1.1 沉积微相

沉积微相是控制油水平面运动的主要因素,也是控制剩余油平面分布的主要因素。河道运移的向下侵蚀和叠加使得在不同时期形成极不规则的砂体沉积类型,关系也很复杂。在两个时期形成的河道或者与低渗透薄砂岩层、与废弃河道的泥质充填或者尖灭区域有关。这些位置和附近区域都是可能富集剩余油的地带。研究表明,在大规模河道砂岩沉积的油藏中,剩余油主要分布在砂体被部分破坏的地带,因为砂体大面积分布且具有很好的连通性,水平方向上所有井点均有不同程度的水淹。在水下分流沉积油藏中,剩余油主要分布在河道间薄砂岩层中的薄砂层、砂体物理性质部分破坏的河道边缘、以及小的透镜状砂体内(这是通过井网很难控制的)。在注入水开发过程中,在相同条件下,河道微相和河口坝微相砂体吸水能力较强,而前缘席状砂等吸水能力较差。另外,水在不同的相带中的流动速度也不同,相对界面对水的跨相带流动往往起一个遮挡作用。双河油田注入水在河道中运动速度最快,其次是在河坝内,最慢的是在席状砂、河道间等低渗透微相带。

美国在进行提高采收率试验时发现,油田的石油采收率受到各种地质因素的影响。不同开采阶段,各因素所起的作用又千差万别。如,在一次和二次采油阶段,起控制作用的是一些大的地质特征,像断层、油藏类型、砂体连续性等。而在三次采油阶段,微观特征的影响则显得特别突出。通过对实验中遇到的各种地质问题进行分析后,认为决定石油采收率的基本地质因素是储层的非均质性。他们还把非均质性划分为沉积非均质性、构造非均质性、成岩非均质性和流体非均质性。

在这四个非均质性中,沉积非均质性是最基本的,也是重要的。它在一定程度上控制了成岩非均质性和流体非均质性。构造非均质性研究有其独特的方法,需要采用新方法或改进

现有技术（如高分辨率地震）来提高。预测碎屑岩的流体非均质性比较困难，必须建立在综合研究前三者的基础上。

沉积相是控制沉积非均质性的基本因素。在油田开发中经常出现的“层内矛盾”和“层间矛盾”在很大程度上是由沉积相控制的油层非均质性引起的。沉积相影响剩余油分布具体表现在以下几个方面：

（1）沉积相带控制了注入水的运动规律。

在河流沉积体系中，无论注水井布置在何种微相，注入水总是就近进入河道。在河道内，注入水沿河道下游方向快速推进，然后才向河道上游和两侧运移。

（2）沉积相决定了油层的水洗类型。

河道砂体具有向上变细的正韵律层序，底部岩石的孔隙度和渗透率级都高于上部。注入水先沿底部突进，同一层内，上下渗透率级差越大，非均质性越严重，底部水洗越明显，河道砂体属底部水洗型。

对滩坝型砂体，如河口坝、边心滩，基本上是微下细上粗的反韵律层序，上部有较大的流通孔道和较高的渗透率。在重力和毛细管力的共同作用下，注入水进入相对均匀，水线推进缓慢，水淹厚度大，层内水洗均匀。因而，滩坝型水体属均匀水洗型。

有的砂层，如部分河道砂岩，多为复合韵律沉积，属不规则水洗型。

（3）沉积相控制了水淹规律。

河道相油层的油井见效、见水期短，易出现暴淹。而滩坝型地层，油井的见效、见水期长，注水效果好。

2.1.2 沉积单元

沉积单元是控制油水垂向流动的基本单元。大庆油田大多数厚油藏都属于复合层、复合韵律沉积。研究表明，复合韵律油藏通常由二三个沉积单元叠加而成，且每个单元都受正韵律分布控制。从观测井的岩心分析数据表明，厚层的水侵情况与正韵律油藏规律相符，即沉积单元底部高渗透层水侵严重，水侵程度由底部向顶部逐渐减弱。从复合沉积单元、复合油层叠加而成的油藏剖面可以观察到水侵。

2.1.3 沉积韵律

正韵律油层顶部形成剩余油富集，反韵律油层顶部形成剩余油富集，复合韵律油层纵向上出现多个渗透率段，在相对低渗透部位水洗较弱，形成剩余油富集。韵律对剩余油分布的影响还与注采井距和射孔状况有关，若注采井距小，重力的作用与驱动力的作用比较起来便处于次要地位；油层若采用选择性射孔投产，也就抑制了重力对注入水波及体积的影响。

2.1.4 渗透率差异

沉积单元中渗透率的差异控制着油藏中剩余油的垂向分布。由于地层中渗透率的差异，注入水沿高渗透层驱进。注入水很难波及到低渗区域，从而导致厚地层顶部剩余油富集。

2.1.5 非均质性

由于沉积的不同特征，有时造成储层横向和纵向非均质极为严重，这就造成有大量剩余油滞留在储层内。

平面上，中部扇中的斜坡槽及迁移槽为物性有利分布区，采出程度高，易水淹，目前剩余油饱和度低；远端砂及漫溢等微相物性普遍较差，不易水淹，目前剩余油饱和度相对较高。

纵向上，由于层间和层内存在非均质性，造成高渗透带动用程度高，水洗严重，剩余油

相对较少，中、低渗透带动用程度低，甚至未动用，水洗较轻，剩余油相对较富集。

统计表明，层间非均质性越强，则采出程度低、剩余油储量高，层间非均质性受控于沉积环境，一般在高能量环境下形成的砂体渗透率、原始地质储量丰富，采出程度高，剩余油量与原始地质储量的比值相对较小，而在低能量环境下则表现出与之相反的特征。这说明沉积相带首先决定了原始地质储量的丰度，进而也影响了采出程度和剩余油量的大小和分布。

层内非均质性主要表现为层内渗透率的非均质性，它控制水驱油的波及厚度，影响着油藏的吸水剖面和产液剖面，同时也是油藏开发中层内矛盾的主要控制因素。

2.1.6 储层孔隙结构

石油大学陈亮等进行孔隙网络微观模型实验，探讨胡 12 块水驱剩余油的形成机理，以及储层孔隙结构、注入速度等对水驱油分布的影响。储层孔隙结构是影响水驱油效果及剩余油分布的重要因素之一。在非均质性比较严重的储层中，如高低渗透层结合的部分，阻力较小的粗、中型孔道是水流的主要通道，注入水首先沿着这些通道向前推进，并造成注入水过早地在生产井突破，剩余油主要分布在低渗透层中的细喉道中，水驱油采收率比较低；而均质性较好的储层，注入水均匀向前推进，剩余油分布数量较少，主要分布在孔壁表面，因此水驱油采收率较高。

2.1.7 夹层

注采井组内分布稳定的夹层，将厚油层细分成若干个流动单元，易形成多段水淹。若夹层分布不稳定，则表现为注入水下窜（重力作用），不稳定夹层越多，其间油水运动和分布也就越复杂。夹层的存在减弱了重力和毛细管力的作用，对于正韵律、块状厚油层来说，夹层有利于提高注入水纵向波及系数，而对反韵律油层则不利于下部油层的动用。不稳定夹层的位置不同，水线推进形态各异，造成水淹状况的复杂性。当只是注入水井有夹层，夹层越长越有利于上部水驱，在一定注采井距内，夹层长度达到井距之半，上、下层水线推进距离就很接近；当只是油井有夹层，水线前缘遇到夹层以后，就沿着夹层分段推进，夹层越长水淹厚度越大。在夹层分布不稳定的注采井组内，底部水淹严重。

2.1.8 裂缝

裂缝的发育程度和油井的生产状况有很大不同，数值模拟表明二者具有较好的一致性。裂缝的分布总是具有明显的方向性，其中大裂缝通常是注入水驱替的主要方向，在此方向上与大裂缝连通的各种储集空间驱油效果较好。同时有效裂缝的展布方向也是注入水流推进的主要方向。因此，大裂缝发育的高渗透区块水淹比较严重，中小裂缝发育的低渗透区块剩余油饱和度比较高。油藏裂缝参数分布与剩余油参数分布之间的关系和规律如下：

(1) 凡孔隙度、裂缝密度和裂缝开度皆大者，剩余油厚度最小。属于大洞、大裂缝发育区域。

(2) 对于孔隙度、裂缝密度皆大，而裂缝开度小的区域，其剩余油厚度最大或较大。微、小裂缝在起作用，属于微、小裂缝发育区域。孔隙度大的层段、开度不一定大。

(3) 对于孔隙度、裂缝密度和裂缝开度皆小者，剩余油厚度也很小，属于裂缝极不发育的单纯岩块区域。

(4) 对于裂缝开度较大而孔隙度和裂缝密度中等的区域，剩余油厚度中等。

(5) 对于孔隙度最大、裂缝密度中等、裂缝开度中下等值的区域，剩余油厚度大，属于岩块和微裂缝发育区域。

2.1.9 微结构和封闭断层

微结构和封闭断层对剩余油形成天然屏障。微结构指的是由于古地形和对油藏顶部的压实作用所引起的部分或微小波动而造成的结构。在重力作用下,这种微结构将会在一定程度上控制地层中注入水的流动。如果在微结构的顶部没有钻井,那么剩余油将会残留在这里。

此外,断层的阻隔可能引起注采体系的不完整,从而导致断层和注入井的另一侧存在大量的剩余油。

在曲流河道油藏中,除了上述因素外,河道砂体边缘上倾岩性尖灭、废弃的河道充填、低渗透岩相带、微观不均一性都控制着剩余油的形成和分布。在漫滩环境的结构单元、决口扇的生油油藏、决口水道、细粒岩床和天然堤中孔隙度和渗透率都比较低,规模也比在曲流河道油藏中的要小,它们形成的剩余油分布情况很不理想,难以开采。

2.2 影响剩余油分布的开发因素

在所有的开发因素中,最重要的就是注采系统的完善程度以及它和地质因素的处理关系。不稳定砂体分布、小砂体或井网控制程度低都可能导致注采系统的不完善(没有生产井或没有注入井),从而形成剩余油。注采关系也是影响剩余油分布的一个主要因素。在主流线上的地层发生严重水侵,而在非主流线上的地层则水侵程度较轻。当地层性质不发生变化时,水驱井网也对剩余油的分布起着很大的影响。

2.2.1 井网影响

井网密度越大,水驱控制程度越高,则注入水波及系数越高,剩余油富集部位越少。不同井网形式的面积注水波及系数大小也不一样。在线性井网模式下,如果地层性质沿注入井方向变化很大,则甚至在两口注入井之间都有可能存在剩余油。剩余油富集区通常位于两口生产井的中线上。然而在四点法面积井网中,甚至在稳定地层条件下,剩余油可以存在于注入井之间的压力平衡区域。

早期的各种实验表明,见水时七点法和五点法面积波及系数较大,反九点法最低。当井网不完善或不规则,或一套井网开采多个油层段时,加上油层平面、纵向非均质的影响,则可以形成多种形式的剩余油富集部位。

2.2.2 其他影响因素

(1) 岩石润湿性。

从油藏的层次性来看,宏观层次的润湿特性是微观孔隙水平润湿非均质性的表现,油层润湿性是油层表面润湿性的总和。对于实际含油区来说,一般认为,初始含水饱和度高的区域表现出水润湿性,而初始水饱和度低的区域则具有中等润湿性或油润湿性。通过大量实验研究定性认识到润湿性强烈影响着水驱动态、毛细管压力和相对渗透率,控制着多孔介质中流体的流动及其分布。西南石油学院的胡雪涛、郭肖等曾采用数值模拟的方法研究了油藏润湿性对剩余油分布的影响。数值模拟研究表明在中等润湿条件下,水驱油驱替效率最高,剩余油主要以小液滴存在,驱替所形成的流态图表现出较低的剩余油饱和度;相反,在水湿条件下,水驱油驱替效率最低,剩余油主要以大液滴存在,驱替所形成的流态图表现出高的剩余油饱和度。在油湿性条件下,驱替效果与剩余油饱和度处于以上两者之间。数值模拟所表现的结果与所做实验结论吻合较好。微观实验研究表明,驱替效率受润湿性的影响,从水湿、油湿到中等润湿,微观驱替效率依次增加。

(2) 指进发育程度。

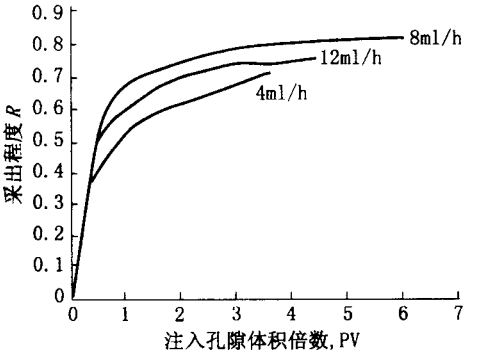
我国多数主力油田已进入高含水开采阶段，注入剂指进现象及其对采出程度的影响以及剩余油分布特征的研究有重大的社会、经济价值。朱九成等研究表明，水驱油驱替初期的指进与油水粘度比、注入通道的不规则性、介质非均质性，特别是注入端附近的非均质性以及驱替速度有关。朱九成等在三种不同的驱替速度下，对不同的油水粘度比的油样进行水驱油实验，采集各阶段的指进发育情况、剩余油分布图像。实验结果表明：油水粘度比越大，指进越容易激发，并且激发之后，发育越快；驱替速度越大，毛细管数越大，指进发育程度越大；注入通道的不规则性或注入通道附近介质非均质性很容易在驱替初期触发指进，而在较高的油水粘度比、较高驱替速度下，初期指进可能快速成长为大的指进分叉，造成见水过早及大块被驱替相的圈闭，降低驱替相的波及系数；指进越发育驱替相所圈闭的被驱替相越多，剩余油饱和度越高。

(3) 驱替特征曲线。

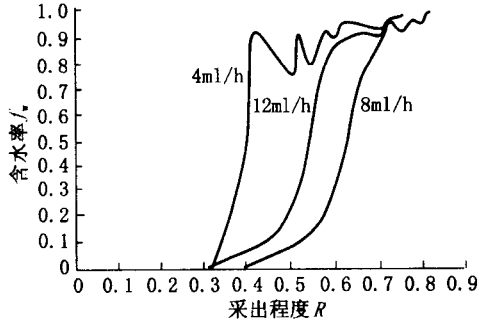
在介质一定的情况下，油水粘度比及毛细管数是影响采出程度、含水率变化的决定因素。Jens Fender (1991) 认为，毛细管驱替时采收率最大，大多数矿场技术人员也持同样的观点。黄廷章教授 (1990) 则认为，只有当驱替速度与毛细管渗析速度相等时采收率才最大，驱替效率才最高。朱九成等分别按照 4ml/h、8ml/h、12ml/h 进行驱替实验，实验证明了这种观点是正确的，由图 2-1 可以看出，在相同注入孔隙体积倍数的情况下，中等驱替速度的采出程度偏大，含水率也偏低。此外，还可由驱替特征曲线观察到含水率的波动，虽然总体趋势是上升的，但不能排除下降的可能，这与指进发育直接相关。这一现象在矿场是普遍存在的。

(4) 注入速度和注入方式。

石油大学陈亮等进行孔隙网络微观模型实验，探讨胡 12 块水驱剩余油的形成机理，以及储层孔隙结构、注入速度等对水驱油分布的影响。模型为高、低、中渗 3 层模型，总孔隙体积为 0.0359ml，原始含油饱和度为 79.28%，束缚水饱和度 20.72%。实验结果见表 2-1。



(a) 采出程度随注入孔隙体积变化



(b) 含水率随采出程度的变化

图 2-1 油水粘度比为 14.7 时的驱替曲线

表 2-1 微观水驱油实验数据

驱油方式	注入速度 ml/h	注入量 ml	采收率 %	采收率增加值 %	剩余油饱和度 %
常规驱油	2.0	2.0	67.74		25.57
提速驱油	5.0	2.0	75.81	8.07	19.18
抽汲驱油	5.0	2.0	83.87	8.06	12.79