

残余油饱和度确定方法



[美] D.C.邦德等编著



石油工业出版社

E15

3
3

残余油饱和度确定方法

〔美〕D.C.邦德等编著

王 平 胡世济 张宏逵 译

王 福 松 校

石油工业出版社

A923430

目 录

序言	1
第一章 残余油饱和度和三次采油	4
导言	4
三次采油潜在储量	4
残余油饱和度的定义	7
残余油饱和度的估算	8
三次采油经济效益对残余油饱和度的敏感性	11
总结	12
第二章 取芯方法	14
导言	14
地层岩性的影响	15
泥浆性能的选择	15
取芯方法	17
常规金刚石钻头取芯	18
橡皮套取芯	22
压力取芯筒	24
总结和结论	27
第三章 岩芯处理和岩芯分析方法	31
导言	31
井场上岩芯的处理和保存	33
常规金刚石钻头取的岩芯	33
压力取芯筒取出的岩芯	34
分析方法	35
渗透率	35
孔隙度	35
流体饱和度	38
用压力取芯筒取出的岩芯测流体饱和度	40

注水驱替试验	41
基础注水试验	42
油水相对渗透率资料	42
原态、新鲜或恢复原态岩芯的应用	43
不稳定状态和稳定状态条件的应用	44
补充试验	46
孔隙度随上覆压力而下降	46
电性测量	48
阳离子交换能力	50
润湿性	52
声波速度	53
颗粒密度	56
总结和结论	56
第四章 体积法和开采资料	62
导言	62
开采史	62
残余油饱和度的计算	63
开采曲线	66
物质平衡方程	69
模型	71
总结	72
符号	73
第五章 测井法	75
导言	75
电阻率测井	77
电阻率测-注-测	78
电阻率测-注-测技术的小结	79
脉冲中子俘获测井	80
常规脉冲中子俘获测井技术	81
测-注-测注水技术	82
用化学剂驱油的测-注-测技术	82
脉冲中子俘获仪读数所必需的校正	84
脉冲中子俘获测-注-测技术的小结	86

核磁测井	87
重油的常规核磁测井	88
正常油层的注-测技术	88
核磁测井注-测技术的小结	90
碳/氧测井	92
伽马辐射测井	93
介电常数测井	93
结论	94
符号	95
第六章 试井方法	99
导言	99
单井不稳定试井法	100
压降试井	100
压力恢复试井	106
饱和度的计算	111
多井试井法	114
干扰试井	114
饱和度的计算	120
计算机方法	121
用产量计算饱和度	122
总结	125
符号	126
第七章 单井示踪剂法	132
导言	132
示踪剂运动的理论	133
可能的矿场测试方法	134
双井法	134
单井法	135
化学示踪剂	137
典型单井测试的设计和施工	138
影响示踪剂测试可行性和敏感性的因素	143
测试井的准备	143
测试流体量的设计	144

示踪剂注入流体的处理	145
矿场试验小结	146
结论	147
符号	148
第八章 评价	150
导言	150
残余油饱和度的对比: 物质平衡法与其他方法的比较	151
孔隙度测定: 固结地层	152
孔隙度对比的矿场实例	153
压实效应: 固结地层	155
孔隙度测定: 未固结地层	158
原始含水饱和度	159
电阻率测井的解释	160
油基泥浆取芯	164
恢复原态的毛管压力试验	164
残余油饱和度: 水淹区	166
残余油饱和度的垂向分布	167
残余油饱和度的平面变化	171
确定残余油饱和度的新的测井法和岩芯法	181
脉冲中子俘获测井 (PNC)	181
脉冲中子俘获测井的测-注-测技术	182
感应测井测-注-测技术	185
核磁测井	186
岩芯分析	186
从油藏动态确定残余油饱和度	190
物质平衡法估算的地质储量	190
用试井方法确定残余油饱和度	193
由综合压缩系数确定 S_{or}	193
由有效渗透率确定 S_{or}	195
根据水油比确定 S_{or}	199
单井示踪剂	200
背景	200
孔隙度、渗透率和残余油饱和度的垂直变化	201

注盐水引起的残余油性质的变化	206
残余油饱和度的确定, 所有方法结果的对比	208
第九章 结果—建议	216
导言	216
砂岩油藏残余油饱和度确定的总结	217
由地层电阻率确定的 S_{or}	218
由脉冲中子俘获测井确定的 S_{or}	218
用压力岩芯确定的 S_{or}	219
单井示踪剂试验确定的 S_{or}	220
残余油饱和度和油层性质的关系 (砂岩油层)	220
残余油饱和度地下测量和其它研究的对比 (砂岩油层)	223
碳酸盐油层残余油饱和度确定的总结	226
残余油饱和度的地理和地质分布	227
残余油饱和度确定方法的选择	227
总结	239
附录	241
三次采油法	241
三次采油法的描述	242

序 言

美国州际石油合同委员会 (IOCC) 执行委员会, 于 1971 年 3 月 15 日在得克萨斯州沃思堡召开的一次会议上, 通过了一项关于州际石油合同委员会研究委员会活动的提议。其内容如下:

研究委员会的任务是负责向委员会汇报现有保护油气资源方法的新理论及改进措施。它所选择的计划, 要使委员会和签订合同的州了解在能源开发(与保护资源活动相一致的)方面正在研究和已经使用的技术的进展。在这一工作中, 鼓励研究委员会在增加目前油气采收率方面的创造性和设想。

州际石油合同委员会的研究委员会为响应这一指示, 组织了一个采收率分会, 其任务是对二次采油和三次采油方法的技术情况进行综述。该分会写了《二次采油与三次采油法》一书, 并由州际石油合同委员会于 1974 年出版。

在写这本书的过程中, 该分会成员及研究委员会的成员, 越来越清楚地认识到确定石油储量的重要性。他们看出, 准确掌握油藏的石油储量, 在一次采油和注水或注气常规开采之后, 是对提高采收率前景进行经济评价的关键因素。

因此, 研究委员会于 1975 年成立了残余油分会来研究这一问题, 即“我们怎样能够确定油藏有多少残余油供提高采收率?”

残余油分会的会员有:

D.C. 邦德 (D.C. Bond) 主席, L.F. 埃金斯 (L.F. Elkins)

R.J. 布拉克韦尔 (R.J. Blackwell) C.R. 霍科特 (C.R. Hockett)

F.W. 科勒 (F.W. Cole) E.H. 凯夫 (E.H. Koepf)

H.A. 迪恩斯 (H.A. Deans) F.H. 波埃特曼 (F.H. Poettm-

ann)

小R.C.厄劳埃(R.C.Earlougher, Jr) R.E.怀曼(R.E.Wyman) 他们的研究成果已汇编成这本《残余油饱和度确定方法》一书。

本书各章节由该分会成员分别编写:

R.J.布拉克韦尔,第一章“残余油饱和度与三次采油”及附录“三次采油法”;

E.H.凯夫,第二章“取芯方法”及“岩芯处理——岩芯分析法”;

F.W.科勒,第四章“容积法及开采资料”;

R.E.怀曼,第五章“测井法”;

小R.C厄劳埃,第六章“试井法”;

H.A.迪恩斯,第七章“单井示踪剂法”;

L.F.埃金斯,第八章和第九章“评价”和“结论—建议”。

虽然本书各章节内容由以上作者分别编写,但有些章节仍代表了该分会的一致看法。特别是第一、八和九章,代表了大多数成员的观点。在有重大分歧之处,我们则力图体现双方的观点。

D.C.邦德、C.R.霍科特和F.H波埃特曼组成了编辑委员会,他们对各章节进行编辑加工,并编排成册。有些章节由伊利诺斯地质调查所编辑部人员玛丽·安·努南(Mary Ann Noonan)和约内·尼尔森(Ione Nielsen)编辑加工;有些章节的插图由地质调查所绘图人员玛丽·玛尔廷(Marie Martin)绘制,在此,谨向地质调查所给予的帮助表示感谢。州际石油合同委员会的执行委员会主任W.蒂莫西·多德(W.Timothy Dowd)及州际石油合同委员会工作人员玛格丽特·雷(Margaret Ray),在本书的编辑与协调工作中帮助极大。

本书主要是为中级管理人员(工程师、地质师和其他人员)编写的,他们需要对具体油藏提高原油采收率的可能性做出决定。虽然本书并不主要是为研究人员或专家所写,但他们会发现本书对他们也很有用。

我们必须对“提高采收率”及“三次采油”说明一下。有些学术团体把注水及更为吸引人的采油方法统称为“提高采收率”。然而，本书中用的“提高采收率”指的是用常规注水注气方法提高采收率之后提高的采收率。如果不严格地说，“三次采油”就等于“提高采收率”；但这两个术语未必等同。例如，注聚合物是一种非常规的方法，可以归为提高采收率方法一类，虽然它可以不算是三次采油方法。

从概念上说，在研究提高采收率远景时，我们应当知道注入水所波及的那部分油藏的残余油储量，并且应当知道这部分油在油藏内的分布情况。估算能受驱油剂驱替影响的那部分储油量，就需要这种资料。实际上，我们只能了解井筒附近的含油饱和度或油藏大范围的平均饱和度，这取决于所用的方法。

本书描述的方法未必都能精确地测量同一个量。每一个作者描述的是用他自己的方法测量的量值。第一、八和九章对各种方法和所测量值作了比较。

在水淹油藏内，各点的含油饱和度是不相同的。这可能是由于注水本身产生的饱和度梯度引起的，尤其是在亲油的油藏内，或者是由岩石的非均质性引起的。现在的工艺技术允许估计这些差异，但还不完美。由查尔斯·J·曼金 (Charles J. Mankin) 负责的研究委员会的一个分会正在为州际石油合同委员会准备编写一本关于非均质性和采收率的书籍。

残余油分会主席D.C.邦德

第一章 残余油饱和度和三次采油

导 言

必须确定油藏中的剩余油量及其分布情况有几点理由。首先，油藏工程师们往往要求估算残余油饱和度（ROS）以便估算一次采油和二次采油的可采储量。其次，比较确切地了解剩余油的分布是选择、设计三次采油（TOR）方法并对它进行经济评价的基本先决条件。

虽然三次采油法已经研究了几十年，但是用这些方法采出的净产油量，与用一般的一次和二次采油法相比，仍然是很少的。三次采油的应用停留在这种低的水平上，部分是由于技术还有待进一步改进，部分则是由于这种复杂的采油技术需要很大的投资和很高的开采成本。从需要新增石油储量和改善经济状况出发，自然就会提出这样的问题：1)三次采油法可使美国石油储量增加到什么程度？2)成本多大？

这两个问题的答案不仅取决于各种三次采油法的效果，而且更取决于将在三次采油时被驱扫的那部分油藏在注水之后的剩余油量。虽然在文献中已对各种三次采油法进行了广泛的论述，在本书的附录中还是对各种三次采油法的基本特征和潜力作了简要的介绍。在下一节中，将介绍三次采油的潜在储量的预测和可靠估算能被三次采油驱扫的油量的必要性。

三次采油潜在储量

对美国三次采油的潜在储量已作过若干研究。下面将其中三个研究的结果汇总在表1内。

湾岸地区大学研究财团（GURC）预测的177~610亿桶是根

表1 美国三次采油的潜在石油储量

	潜在储量 (亿桶)
湾岸地区大学研究财团 ^[1] (1975)	
——用现有方法能获得的	177~355
——改进经济条件后能获得的	336~407
——改进方法和经济条件后能获得的	503~610
联邦能源管理局 ^[2] (1976)	
——平均石油价格11.28美元/桶	305
国家石油委员会 ^[3] (1976)	
——石油价格15美元/桶	(140?)
——石油价格25美元/桶	(240?)

据一些对三次采油有经验的科学家和公司的调查。虽然“用现有方法能获得的”这一估计潜在储量数字是企图反映在有利的经济条件下的现在三次采油能力，但并未指出这个估算数字所要求的经济条件，也未对相应于“改进经济条件后能获得的”这一估计数字的经济条件给以具体说明。因此，即使这个预测数字显得比其它研究得出的数字更为乐观，但要直接与其它预测数字进行比较是不可能的。

联邦能源管理局 (FEA) 的研究采用了加利福尼亚、得克萨斯、路易斯安那三个州的 245 个油藏 (175 个油田) 的资料；这些油藏按照各种三次采油法的适应性进行了筛选。然后，根据简单的过程模型和注入物质的成本、新井的钻井和完井成本、修井成本、作业费用等的设计，对通过筛选的油藏进行经济分析。305 亿桶这一估计储量数字是根据假定的石油平均价格 11.28 美元/桶这一“上限”得出来的。

随后，国家石油委员会 (NPC) 应用了一种与联邦能源管理局相似的方法。然而，对于三种主要采油方法——二氧化碳混相驱、注表面活性剂、热法——中的每一种方法来说，在石油价格大致可比的情况下，国家石油委员会得出的三次采油潜在储量仅

及联邦能源管理局研究中估计的三分之一到二分之一。由于没有联邦能源管理局研究的计算细节，因此不可能完全准确地计算这两个估计数字的差异^①。

看来，引起上述三次采油潜在储量的差异，至少部分是由于两个研究采用了不同的方法去估算被注入流体所驱扫的那部分油藏体积中的可采油饱和度。联邦能源管理局的研究采用了根据物质平衡法得出的平均残余油饱和度。可采油饱和度，是假定这种平均饱和度均匀地分布在每个油藏中来估算的。而国家石油委员会在注表面活性剂的潜在储量的研究中，采用了较低的残余油饱和度，它相当于根据岩芯分析测量、示踪剂研究等所得出的水淹后残余油饱和度。认为这种较低的值与油层将被表面活性剂驱扫的那一部分的剩余油饱和度值接近。

除了采用不同的方法估算可进行三次采油的油层的残余油饱和度之外，国家石油委员会的研究还认为，在注表面活性剂之后的剩余油平均饱和度为孔隙体积的10%。这个值是根据有限的矿场试验和实验室注入试验结果得出的，这些试验是在注入速度为1英尺/日或最大压力梯度为2磅/英寸²/英尺的情况下进行的。而在联邦能源管理局的早期研究中则假定该值为孔隙体积的5%。这个差异导致联邦能源管理局的研究得出了较高的可采油饱和度估计值。鉴于在估算可采油饱和度中包含有不可靠性，国家石油委员会在其报告中包括了敏感性研究，对“基本情况”的可采油饱和度要增加和减少5%孔隙体积。正如在本章后面所讨论的那样，注表面活性剂的经济效果对这种关键参数是极其敏感的。由于这种参数预计会随表面活性剂系统的段塞大小、能够达到的有利流度比的程度和其它一些因素而变化，所以通常需要进行矿场试验（至少在取得附加的注表面活性剂矿场经验之前需要），以确定任何矿场应用中最佳段塞的大小。

尽管存在这种差异，表1所列举的数字还是表明，如果采取

①参考文献〔3〕中介绍了国家石油委员会得出的结果与其它研究结果的对比。

适当的经济刺激，三次采油对美国将来已知油藏的采油量会作出重要的贡献。而且，这些结果生动地说明，准确地确定三次采油所波及到的那部分油层中的剩余油量是十分重要的。

残余油饱和度的定义

“残余油饱和度”一词在文献中曾从不同角度加以采用。这包括：

- (1) 束缚油饱和度；
- (2) 平均（或物质平衡）饱和度；
- (3) 水波及带中剩余油饱和度。

束缚油饱和度 (IOS) 常常当作残余油饱和度的定义。束缚油饱和度指的是剩余油变为不流动或者完全被束缚时的饱和度。在强水湿岩层中（含低粘油）大约注入一倍孔隙体积的水常常就可接近达到束缚油饱和度；而对于混合润湿系统则要求注入更多倍孔隙体积的水。在某些岩层中，即使经过了很多倍（几千倍）孔隙体积的水的驱扫，仍然保留了小而有限的油渗透率。图 1(萨拉什耳〔4〕) 表示水湿岩芯与相同岩芯变为混合润湿系统

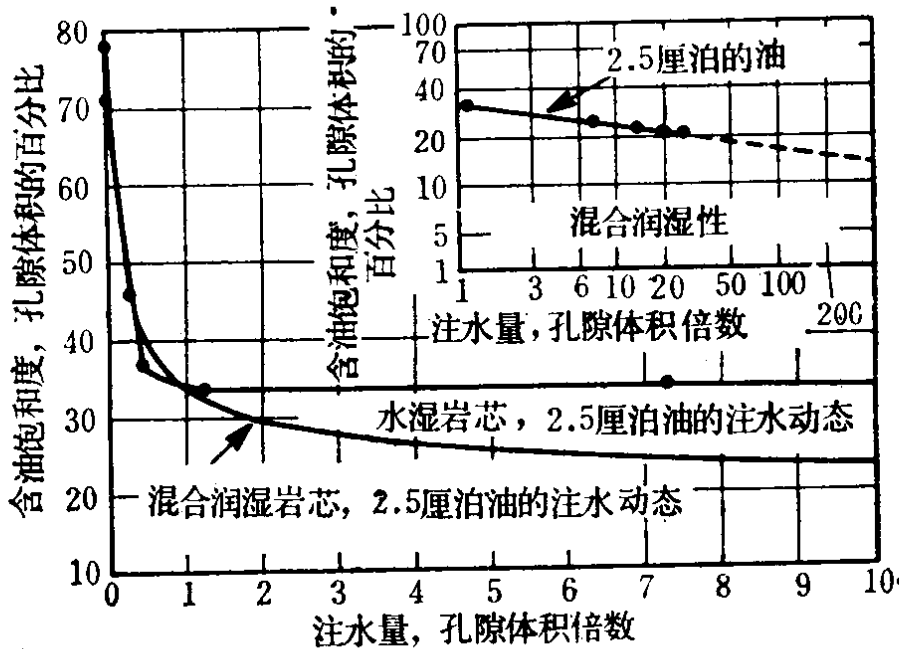


图 1 混合润湿岩芯和水湿岩芯注水动态的对比(右上插图表示混合润湿性岩芯注水动态曲线的外推)(据萨拉什耳〔4〕资料改编)

(与东得克萨斯油田的岩芯很类似)之后的注水动态对比。在混合润湿系统中,在油饱和度接近达到“束缚”值之前,长期为高水-油比(超过100/1)生产阶段。在像东得克萨斯那样的油藏中,最终达到的含油饱和度不仅取决于流过油藏的总水量,而且取决于其它一些因素,如在注水期间夹层内的油发生的重力分异。在这种油藏中靠近注入井的地方有可能达到束缚油饱和度,但是绝不能把这种束缚油饱和度作为油藏其它广大部分的剩余油饱和度。

同样,也常用在注水结束时油藏中剩余油的平均(或物质平衡)饱和度(AOS)作为残余油饱和度的定义。这样的残余油饱和度估算值(也像束缚油饱和度那样)会使人误解。用平均油饱和度所引起的误差是因为剩余油并不是均匀分布的。饱和度的变化是由很多因素引起的,包括重力分异、渗透率的分层性、平面非均质性、油田不同部位流过的总水量的差异等等。由于这样一些因素,油藏中剩余油平均饱和度可能比冲刷带的油饱和度仅仅稍大一些或者可能大很多。

从实用观点出发,当水-油比达到其经济极限时,留在渗透性较好的水驱扫带后面的那种残余油饱和度特别有价值。常把这个定义用于很多三次采油方法的评价和设计工作中。

由于油藏的这一部分是在三次采油过程中最有可能被波及的部分,因此,最好是能对油藏的各个部分的剩余油饱和度有一个全面的了解。遗憾的是,没有一个单一的方法能够得出这种残余油的分布情况,尽管有时通过两种或多种方法所取得的资料可以用来增进我们对“残余”油的总量和分布位置的认识。本书的目的是对几种常用的估算残余油饱和度方法的能力和局限性作一综述。

残余油饱和度的估算

本书要讨论的测量残余油饱和度的方法有:

1. 岩芯分析;

- 2.专门取芯；
- 3.油藏工程研究；
- 4.测井；
- 5.不稳定试井（与岩芯分析资料相结合）；
- 6.化学示踪剂研究。

每种方法都有各自的优缺点。通常要用几种方法所取得的资料来估算水淹后剩余油的数量及其分布。某些方法（例如根据油藏动态资料进行的物质平衡计算）能取得全油藏的平均残余油饱和度。另外一些方法（例如专门的取芯方法和测井方法）可以提供井眼附近残余油的垂向分布资料。还有一些方法（例如示踪剂研究）可以对油藏的大部分进行取样，但是它所提供的是油藏中渗透性较好的那些带内的加权平均残余油饱和度。

究竟哪一种方法或哪几种方法组合起来对三次采油的评价最为有用，则取决于油藏的具体的地质特征和开采历史等等。实际上，由于这些资料在评价三次采油法的经济可行性方面的重要性，只要从所有上述方法能取到资料的话，它们都会被利用。

下面列举的多少有些简化的实例说明了对两种方法（物质平衡计算和示踪剂试验）的结果进行综合分析可以得到的好处。表2列出了应用这两种方法得到的五个油藏的资料。

表2 残余油饱和度的对比

油 田	残 余 油 饱 和 度		
	物质平衡法（占孔隙体积百分比）	示踪剂试验（占孔隙体积百分比）	物质平衡与示踪剂试验的比值
A	16	12	1.3
B	25	12	2.1
C	32	20	1.6
D	40	29 ^①	1.4
E	44	12	3.7

①用压力取芯筒取出的岩芯测得的。

如前所述，物质平衡计算提供的是水淹后油藏中的平均剩余油饱和度，并不能提供关于油的分布方面的资料。另一方面，示踪剂试验倾向于测定那些在未来的三次采油中最容易波及到的、渗透性较好的层段中的剩余油量。而且，如第四章和其它章节所指出的那样，用物质平衡法计算出来的残余油值有很大的不可靠性；它有时高得失去了真实性。因此，在作本章所说的那种综合分析时，我们应当考虑到物质平衡计算值的不可靠性。但是，为了分析起见，我们还是假定表 2 中的估算值是可靠的。

表 2 列出了几组用物质平衡法和示踪剂试验得到的残余油饱和度值，以及物质平衡得出的残余油饱和度与示踪剂得出的残余油饱和度的比值。比值 1.0 可以解释为表示残余油的均匀分布；高比值则表示有大量的油留在没有被示踪剂波及到的地方。据推测，这部分油在三次采油过程中是波及不到的。在油田 A 这个实例中，我们注意到物质平衡法得出的值为 16%，而示踪剂得出的为 12%，这两个值对于现有实际应用的三次采油法来说是太低了；看来，在生产井之间打新井也不大可能发现可观的储量（比值 1.3 表示油的分布是很均匀的）。从钻加密井的观点来看，油田 B 和 E 是很有意义的，因为物质平衡法的残余油饱和度值分别为波及带的剩余油饱和度 12%（由示踪剂试验得出）的 2.0 和 3.7 倍。这些比值表明，在这些油田中有大量呈孤立袋状的剩余油存在。这样，就存在着在现有井之间打加密井来增加近期产量的机会。当然，这只有而且仅仅只有当增产的油量足以使打新井在经济上合算时才能这样做。由于三次采油能波及部分的剩余油饱和度只有 12%，所以它们的三次采油潜力是很小的。但是，打加密井结合三次采油则有可能采出以其它形式留在地下的一定数量的油。根据这些对比，看来 D 油田的三次采油潜力最大，因为它的波及带的残余油饱和度为 29%，而物质平衡计算的饱和度为 40%。有必要进行经济计算，以确定它是不是一个好的三次采油的候选油藏。

但是，进行详尽的经济计算以达到全面的了解是没有必要