

〔苏〕 M. Л. 苏尔古切夫

二、三次提高原油 采收率方法

石油工业出版社

石
油
工
业
出
版
社

57
09

075559



二、三次提高原油 采收率方法

〔苏〕M. И. 苏尔古切夫

卢文瑞 丘 章 黄希陶 译

黄希陶 胡征钦 校



200795210

石 油 工 业 出 版 社



(京)新登字082号

内 容 提 要

本书阐述了二、三次采油提高原油采收率方法的物理基础,在不同矿场—地质条件下使用这些方法的条件、工艺技术及优缺点。

叙述了不同类型油藏注水开发时提高原油采收率的方法,如周期注水、交替注气-水等;用物理-化学方法提高原油采收率方法,如聚合物驱、二氧化碳驱和表面活性剂驱等;高粘原油热采方法,如层内燃烧、蒸汽驱、循环注蒸汽等。还介绍了用矿井法从沥青砂和油页岩中开采烃类的方法。

本书适用于从事油田开发、二、三次采油专业人员及大专院校师生参考。

ВТОРИЧНЫЕ И ТРЕТИЧНЫЕ МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

М. Л. Сургучев

МОСКВА, "НЕДРА" 1985

*

二、三次提高原油采收率方法

[苏]М. Л. 苏尔古切夫

卢文瑞 丘 章 黄希陶 译

黄希陶 胡征钦 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16开本 11³/₄印张 292千字 印1—1,500

1993年12月北京第1版 1993年12月北京第1次印刷

ISBN7-5021-0923-4/TE·862

定价: 9.70元

目 录

前 言	(1)
第一章 油层结构和性质、石油的产状与饱和条件	(3)
§ 1 储集层类型	(3)
§ 2 含油层的物质成分	(4)
§ 3 孔隙空间的非均质性 (微观非均质性)	(5)
§ 4 含油层的非均质性 (宏观非均质性)	(7)
§ 5 原油饱和的条件	(10)
第二章 采油、残余油饱和度	(12)
§ 1 液体运动中天然能量的显示、地下液体的弹性	(12)
§ 2 残余油在油层内的分布	(15)
§ 3 储集层的临界含水饱和度和极限含水饱和度	(17)
§ 4 应用提高原油采收率方法前油层含油饱和度的确定	(19)
第三章 注水—提高油层原油采收率的高潜能开发方法	(23)
§ 1 油藏注水原则	(24)
§ 2 油藏注水方式	(26)
§ 3 布井方式	(28)
§ 4 最佳井网、钻井顺序	(29)
§ 5 解决最佳井网问题的途径	(37)
§ 6 开发速度与原油采收率关系	(38)
§ 7 最佳采油动态	(43)
§ 8 关闭水淹井、停止注水	(45)
§ 9 油气藏注水	(46)
§ 10 裂缝-溶洞型储集层油藏注水	(47)
§ 11 原油性质异常的油藏注水	(48)
§ 12 油藏油水过渡带的开发特征	(49)
§ 13 地质-物理因素和工艺因素对油藏注水效果的影响	(50)
§ 14 根据统计模型预测注水效果	(54)
§ 15 油藏注水所需水量	(60)
§ 16 注入水的性质和处理	(62)
§ 17 油田注水的适用性准则	(64)
§ 18 油田注水实践	(65)
第四章 提高油层原油采收率的新方法	(69)
§ 1 提高油层原油采收率方法的分类和用途	(71)
§ 2 提高油层原油采收率方法的发展方向和发展阶段	(72)
§ 3 成功应用各种方法的条件及其在具体油田上推广应用的原则	(74)
§ 4 提高油层原油采收率方法的适用性准则	(75)
§ 5 提高油层原油采收率方法的适用性补充准则	(78)

§ 6	提高油层原油采收率方法的效果	(80)
§ 7	开发晚期应用提高采收率方法的工艺效果评价	(81)
§ 8	开发早期应用提高采收率方法的工艺效果评价	(84)
§ 9	经济效果评价	(85)
第五章	注水提高油层原油采收率的物理-水动力学方法	(86)
§ 1	周期注水对油层的作用	(86)
§ 2	周期注水对油层作用的效果	(89)
§ 3	周期注气-水对油层的作用	(92)
第六章	改善注水的物理-化学方法	(94)
§ 1	注非离子表面活性剂水溶液驱 (活性水驱)	(94)
§ 2	注聚合物溶液	(99)
§ 3	碱水驱	(105)
第七章	用物理-化学方法提高水淹层的原油采收率	(112)
§ 1	二氧化碳驱油	(112)
§ 2	注胶束-聚合物溶液	(127)
第八章	高粘原油热采方法	(148)
§ 1	层内燃烧法	(148)
§ 2	蒸汽驱油	(154)
§ 3	循环注蒸汽	(157)
第九章	用矿井法从沥青砂和油页岩中开采烃类	(159)
§ 1	重油、沥青和油页岩的性质和储量	(159)
§ 2	重油和沥青的矿井开采	(160)
§ 3	热矿井开采重油 (沥青) 的工艺	(160)
§ 4	热矿井开采重油和沥青的工业试验	(162)
§ 5	矿井开采油页岩和在地面提取烃类的工艺	(162)
§ 6	从油页岩层内提取烃类的工艺	(163)
§ 7	从油页岩中提取烃类的工业设计和效果	(164)
第十章	应用提高油层采收率方法的不确定因素和风险性	(166)
§ 1	在不确定因素和风险条件下的决策	(166)
§ 2	预测效果不确定性的综合特征	(169)
§ 3	风险指标的确定	(169)
§ 4	提高油层采收率方法的工业性试验	(171)
§ 5	工业性推广应用提高油层采收率方法的资金合理分配	(174)
§ 6	打开油层的条件对提高原油采收率方法的影响	(178)
结束语		(181)
参考文献 (略)		

前 言

近年来,提高已知油田的原油采出程度,即石油工作者常说的提高油层原油最终采收率的问题,已成为最重要的经济问题之一。苏联业已规定,在1981—1985年和到1990年期间的经济和社会发展的基本方向是进一步完善石油这一天然资源的利用,提高油层原油采收率,实施从含沥青岩石中提取石油的科学研究和工业性试验工作。

提高原油采收率的计划在苏联第十一个五年计划的社会经济发展目标综合规划中,具有重要的地位。所有工业发达的产油国家(美国、加拿大、英国、德意志联邦共和国等)政府的能源规划中均把提高原油采收率的问题看作是增加其石油资源和减少石油短缺的一种手段而给予重视。现在,这个问题已成为石油专家们在有关国家机构内、政府间协定中,各种国际性学术会、讨论会、报告会以及定期出版物中专门讨论并作出决议的对象。

70年代初,由于中、近东一些国家对西欧和美洲的工业发达国家压减石油供给量而发生的所谓世界能源危机之后,石油已是人们关注的中心,特别是在讨论和预测作为整个经济发展基础的世界燃料-能源总体发展时更是如此。因而,把提高油层采收率这个问题看作是增加石油资源,缓和石油的需求以及将来过渡到选取其它能源的一种手段,具有特殊的意义。

一般来说,有关提高地质-自然条件不同的油田现阶段实际欲达到的油层原油采收率、各种因素对它的影响、以及今后提高采收率方法发展的前景和主要方向等问题,都是经常出现和需要讨论的问题。

今后所需要的物质-技术装备的生产问题,增加原油产量和可采储量的经济条件和潜力以及改造周围和地质环境等问题尤为突出。在此情况下,不同机构和不同水平的专家利用各自的见解和判断,以不同方式提出了课题的内容及其解决的途径和方法以及与其他专业的关系和对它们发展的影响。因此,在研究和这些方法时会产生诸多矛盾和不十分清楚的地方,以及在试验和推广这些方法来解决实际任务时会遇到困难和复杂情况。尤其在解释和讨论油田开发和提高油层原油最终采收率的国外经验时会出现很多矛盾。

30多年来,作者有机会直接从事研究油田开发和提高油层原油采收率的各种不同的情况,即研究了水或其它工作剂驱油的效率,设计了许多油田的开发程序和方法,综合了国内外经验,预测了开发方法进一步发展的远景,明确了对物质-技术装备的需求及其规定,并与各方面的专家一起讨论了上述问题。

苏联和其他国家广泛应用的油田注水方法,按其对于油层作用机理和实施条件而言,虽较为简单,但研究工作仍然未终止。有关注水后残余油的分布状况及不同因素对其数量和分布的影响等许多有争论的问题仍然存在,而这一方法的效果已经在许多场合下不能满足实际的需要。由此,最近15—20年来专家们已在注水效果差的地区开始运用不同工作剂、气体或热载体探索一些改善注水的方法和手段。

提高油层原油采收率方法是非常复杂、昂贵和研究得少的方法,其效果在实际条件中与很多地质-自然因素和工艺技术因素有关。用这些方法采出一吨原油所建产能的费用比常规注水高5—10倍。因此,工业性应用提高油层原油采收率方法将得不到良好效果,或者甚至会遇到经济损失的风险,而且研究、试验和采用这些方法的决定有可能会在情况不明的条件

下通过。

本书的目的在于，根据国内外研究、试验和应用提高油层原油采收率方法的经验，分析已知的和欲采用的各种方法的现状，明确当前存在的问题，进一步阐明那些已得到初步解决和论证的问题，指出风险和情况不明的程度，以及在运用这些方法时可能出现的困难和复杂性，并根据油田和方法本身研究的条件，促使对大规模试验、推广和应用一些有效方法作出较正确的决定，以及确定一些最重要的研究课题。

提高油层原油采收率——提高原油采出程度——是石油工业发展的整个历史进程中一个最迫切最严峻的问题。每一个发展阶段内，专家们竭力通过提高打开油层的质量、处理近井底地带、井位布置、人工改造油层、控制生产过程等措施来延长油井产油时间，提高产能及改善驱油条件。

苏联石油工业在这一方面已取得很多成就。油田开发的方法、方式和工艺技术全面地反映了科学、技术发展的现代水平。这就能够以较少的井达到高的产油量和高的采出程度。

在编写这本书时，作者利用了全苏油气科学研究所B. T. 巴依舍夫，A. A. 博克谢尔曼，C. A. 日丹诺夫，A. T. 戈尔布诺夫，A. A. 拉科夫斯基，E. И. 谢明，T. A. 布尔丁，M. П. 阿鲁善诺夫，Л. H. 布钦科夫，Д. П. 扎勃罗晋，E. A. 季斯金，B. K. 戈姆季科夫，A. M. 波里休克，B. Г. 米哈涅维奇，Г. C. 马留季娜，Ю. C. 萨维尔耶夫，B. B. 苏林娜，B. П. 塔巴科夫和И. H. 莎尔巴托娃等同事们提供的资料及成果，在此作者表示谢意。

第一章 油层结构和性质、 石油的产状与饱和条件

为了有效地控制采油过程，特别是为了用物理-化学法或热法解决提高油层原油采收率的问题，必须详细了解油层的结构和性质，原油在其中聚集和渗滤的条件。负责发展和推广提高原油采收率方法的决策者们，同样需要掌握即使是一般的且是正确的有关油田结构、原油埋藏和开采特征以及油层性质的一些概念。同时，到目前为止，甚至石油专家们对上述问题仍没有明确的和一致的认识。有些不直接从事油田开发的人们还错误地把油藏看作是一些含油的均质地层，认为只需要钻些井和注入任何一种工作剂就可以从油层中《取出》多少多少的廉价原油。这是一种误解，它与真实情况、与原油埋藏及其从地下采出的实际条件还差得很远。

事实上，原油不均匀地浸透在深埋的致密多孔的低渗透（多数油藏是如此）岩石—砂岩、石灰岩或白云岩中。油藏结构的复杂性难以想象。由于在含油气层中不规则地分布着厚度不同的非渗透性透镜体、薄层和夹层，所以含油气层的物理性能和渗滤性能的变化是完全无规律的。在这样的条件下，如何在原来含水的地层中能形成与毛细管力作用相反却严格符合重力作用的统一油藏的问题，直到目前还尚未阐明。石油工作者面临着任何其他专业人员所未能遇到的特殊困难条件。他们对自己的主要研究和开发对象——油层——既不能直接看见，也不能直接度量、称重。所有用以评价原油储量和开发设计所需要的地层模型是在从数量有限的一些井中获得的少量资料基础上建立起来的。在面积为数十至数百 km^2 的油藏内取到地面的岩样面积不超过 $1\text{--}2\text{m}^2$ ，当需要确定开发方式时，根据这些样品可以得到有关油层结构的概念。但严格地说，专家们都不掌握油层定量特性和石油储量的精确性。由于这些原因，有关油藏结构和石油储量的概念常常是相对的。因此，油田研究早期所采纳的开发方式基本上不适合油藏结构的所有特征。随着新资料的取得，油田开发方式应不断地完善充实。遗憾的是，这些油藏的采油过程不能以直接方法得到直接监控。因而，专家们对不同因素对影响采油效率的及有关油田开发的最佳条件和合理开发方式有着不同认识和解释。然而，世界上所积累的油田开发的经验一致表明，油层宏观和微观的非均质性、储层的含油饱和度、原油的埋藏条件和粘度、孔隙介质的物质成分和润湿性等均对油田开发效果和地下原油采出程度有很大的影响。这些特性在具体的油田上变化很大，在解决提高油层原油采收率问题时应认真加以考虑。

§ 1 储集层类型

油气储集层是指具备能储存液态烃或气态烃的物理（结构）性质以及有压差存在下具有渗滤能力并能产出油气的岩层。判断油气储集层的主要标准是容积特征和渗滤特征，它们取决于岩石（物质）的成分、孔隙度和渗透率，而更概括地说，取决于储集层类型。通常油气储集层分为碎屑岩类储集层和碳酸盐岩类储集层。

碎屑岩类储集层 碎屑岩类储集层是由不同类型胶结物所胶结的不同大小的岩石碎屑颗

粒组成的。通常这类岩层是由胶结程度不同的砂岩、粉砂岩及其泥岩夹层组成。岩石的矿物成分和颗粒成分对鉴定其储集性能来说具有很大的意义。

按矿物成分，碎屑岩类储集层可分为石英质碎屑岩储集层和复矿碎屑岩储集层。

石英质碎屑岩储集层是在自然界沉积过程中石英颗粒起主导作用的条件下形成的。这种情况下形成的岩石以石英砂为主（达95—98%），一般具有良好的储集性能、孔隙度和渗透率。原始含油饱和度达到80—95%），而水饱和度为5—20%。

复矿碎屑岩储集层在沉积过程中除石英颗粒外，还有相当数量的长石颗粒及其化学作用产物存在的条件下形成的。所形成的岩层含有大量（25—50%）的泥质物，从而使其储集性能变差。这种复矿碎屑岩储集层的原始含水饱和度可达到30—40%。

碎屑岩类储集层具有渗滤性能变化范围很大的特征。它们的渗透率变化范围在 $3-5\mu\text{m}^2$ 至 $0.0001-0.001\mu\text{m}^2$ 之间，而孔隙度在25—26%~12—14%之间。已知一些油田，诸如灰谷、阿纳斯塔西耶夫-特洛依茨、东得克萨斯、普拉德霍湾等油田，其碎屑岩层渗透率变化范围在 $0.1-0.2\mu\text{m}^2$ 至 $3-4\mu\text{m}^2$ 之间，平均大于 $1-2\mu\text{m}^2$ 。与此相反，有另外一些油田，如多林那、哈西梅萨乌德等油田和萨莫特洛尔油田A₁油层，其渗透率变化范围为 $0.0001-0.05\mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.005-0.008\mu\text{m}^2$ 。

碳酸盐岩类储集层 这类储集层主要由灰岩和白云岩组成。只有那些名为生物骸灰岩、生物灰岩和碎屑碳酸盐岩才可能具有高的有效孔隙度、渗透率和含油气饱和度，这些岩石的孔隙空间未经受使其容积和渗滤性能降低的次生变化（盐类沉淀）。因此，这类碳酸盐岩储集层的渗透率可达 $0.3-1\mu\text{m}^2$ ，孔隙度达20~50%。一般说来，这样的岩石具团粒结构、疏松、胶结性差，含胶结物10%以内。油藏中岩石原始含水饱和度不超过5—20%。中孔隙和中渗透碳酸盐岩储集层，由于孔隙空间受到次生变化（成岩作用和后生作用）而具有较低的孔隙度（12—25%）和渗透率（ $0.01-0.3\mu\text{m}^2$ ）中粒岩石的胶结程度也较高（10—20%）。中孔隙碳酸盐岩的含水饱和度可能达到25—35%。

细粒、低渗透、细孔隙碳酸盐岩储集层是由经受强烈重结晶作用的、通常所说的基质泥质岩组成，它们具有小的有效容积及极差的渗滤性能：孔隙度8—15%，渗透率 $0.0001-0.01\mu\text{m}^2$ ，含水饱和度35—50%。这类碳酸盐岩储集层的容积性能与基质（岩块）孔隙度有密切关系，其渗滤性能则与岩层裂缝发育程度有关。

高孔隙、高渗透碳酸盐岩储集层是很好的开发对象。例如，乌拉尔-伏尔加区一些油田（波克罗夫、格拉西莫夫、库列绍夫等油田）的巴什基尔阶A₄层就属于这种类型的储集层。

低渗透、细孔隙碳酸盐岩储集层的开发是困难而低效的。属于这类储集层的有乌拉尔-伏尔加区一些油田剖面中的二叠系卡里诺夫组奥克斯层等一些层。

§ 2 含油层的物质成分

含油层的物质成分，特别对用物理化学方法提高油层原油采收率具有重要意义，它主要取决于岩石的结构和矿物成分。

岩石结构是指孔隙介质的结构特征，这些特征受分选程度、颗粒形状及组成岩石各成分之间相互关系所制约。

通常，含油层包括砂岩（粒径为0.1—1mm）、粉砂岩（0.1—0.01mm）和泥质岩或泥岩（小于0.01mm）。自然界中很少遇到粒径均匀的分选好的地层。一般含油气层岩石的粒

级范围甚宽，常见细粒，偶尔见中粒（含不同数量的粉砂和泥质成分）。由此对这些岩石加以命名（取决于不同粒级的百分含量），例如细砂岩，粉砂质细砂岩或粉砂岩等。

储集岩的矿物成分是根据研究岩石的重组份和轻组份测定的。为此，常按照0.25至0.01 mm粒级的矿物密度加以划分；若存在砂岩粗粒结构时，有时可区分出更粗粒级。

构成油层的岩石，常常含一些“重”矿物——锆石、金红石、石榴石和电气石（表1）。

从表1数据可以看出，前三个油田的产层主要是由中粒和细粒砂岩和粉砂岩组成。在其轻组份中，除石英外还含大量长石，从而表明这些砂岩和粉砂岩归属于复矿碎屑岩储集层的亚类。罗马什金和杜马兹油田油层轻组份中几乎百分之百为石英颗粒，几乎完全没有长石颗粒，所以可把它们列入石英质储集层的亚类。

表1 一些油田储集岩的粒级和物质成分

油田，地层	不同颗粒 (mm) 的粒级含量 (%)					物质成分 (%)					
	>0.25	0.25—0.1	0.1—0.05	0.05—0.01	<0.01	可溶于盐酸 中的盐类	菱铁矿	黄铁矿	石英	长石	岩石碎屑
乌津油田:											
XIII	15	35.8	11	6	22	8	2.2	1.8	28	54	18
XIV	2.6	31.5	26.5	9.7	20.5	5.4	2.4	1.4	33.5	48.7	17.8
苏托尔明油田:											
Б10	8.1	55.4	9.5	10.9	12.2	3.9	—	—	42.2	17.9	40.8
瓦特-耶岗油田:											
A ₁₋₂	1.8	57.9	12.9	10.9	13.9	3	—	—	46.3	15.2	38.5
罗马什金油田:											
(阿勃德拉赫曼诺夫区)											
Π层	0.95	88.7	4.63	—	5.7	1	—	—	100	—	—
杜马兹油田:											
ΠΠ层	—	3.36	42.97	1	12.05	—	—	—	99	—	1

§ 3 孔隙空间的非均质性 (微观非均质性)

碎屑岩类实际油层的孔隙度与颗粒的粒级成分、排列密度及胶结类型有关。岩石颗粒的粒级成分越不同，则孔隙通道的“有效截面”和表面性质变化越大，从而会造成孔隙空间的微观非均质性。岩石中可分出毛细管孔隙和亚毛细管孔隙。前者孔径大于0.001mm(>1μm)，后者孔径小于0.001mm(<1μm)。液体只能在毛细管孔隙中运动，因为在亚毛细管孔隙内，由于液相与固相间分子力相互作用而使液体处于停滞状态。如果毛细管孔隙周围存在亚毛细管孔隙，且无连续通道，则液体就不可能在毛细管孔隙内运动，这是在碳酸盐岩中常观察到的现象。

碎屑岩类储集层的孔径变化范围很大，由0.1μm（泥岩和粉砂岩）至500—1000μm（胶结差的石英砂岩）。中渗透（渗透率为0.4—0.5μm²）油层的平均孔径为10—20μm，最大达100—150μm。低渗透（渗透率为0.01—0.02μm²）油层的平均孔径不超过1—2μm，最大为20—25μm。

碳酸盐岩类储集层中孔径变化范围更大，在同样的最小孔径（0.1μm）条件下，最大孔

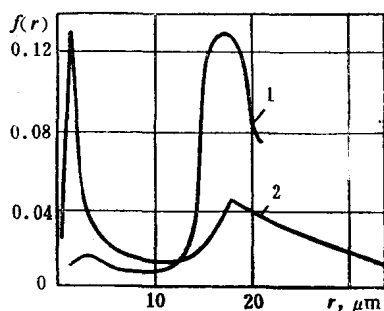


图1 砂岩(1)和石灰岩(2)的孔隙分布密度 $f(r)$ 与孔隙半径 r 的关系曲线
砂岩: 渗透率—— $0.11\mu\text{m}^2$, 孔隙度16.6%, 平均孔隙半径为 $15.4\mu\text{m}$; 石灰岩: 渗透率—— $0.084\mu\text{m}^2$, 孔隙度为20.3%, 平均孔隙半径为 $16.8\mu\text{m}$

储集层的一个很重要的特征是孔隙介质的比面, 即孔隙表面积与孔隙介质的体积或质量之比。对于高孔隙、高渗透性的储集层来说, 其比面不超过 $500-1000\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 岩石。而对粉砂岩、复矿碎屑岩和低渗透碳酸盐岩来说, 它们的比面则达到 $10000-30000\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 岩石($0.5-1.5\text{m}^2/\text{g}$ 岩石)。

孔隙介质的比面与孔隙度和渗透率之间存在如下的比例关系:

$$S_v = G \sqrt{\frac{m}{k}} \sqrt{m}$$

式中 S_v ——比面;

m ——孔隙度;

k ——渗透率;

G ——不同类型储集层的经验系数, 为 $(7-10) \cdot 10^3$ 。

这个特性对于采用物理-化学方法提高原油采收率具有很大的意义。因为任何化学溶液在长时间留在地下时会与岩石表面相互作用, 引起化学剂吸附、分子破坏、溶液和比面之间的分子置换、盐类溶解等一系列作用。

油气层孔隙介质的微观结构的最重要和最基本的特性之一是其表面润湿性。孔隙介质有什么样的润湿特性将决定水驱油的特征、残余油在地下的分布状况以及为减少剩余油所采取的主要措施。

所有的含油气层几乎都是在水介质中(沉积物沉积和胶结)形成的, 并且在其中形成油气藏之前曾是含水的, 因而也是亲水的, 即为水湿地层。在具重力作用的含水层内, 只有在毛细管力的作用下才能形成油气藏。在原油中的有效组份(沥青质)作用下, 油把水从孔隙表面驱走, 使这一表面出现部分憎水现象。由此可以认为、含油气层具有混合的润湿性(部分亲水和部分憎水)或呈中间状态的润湿性。

孔隙介质润湿性的度量单位是以固体表面与孔隙中油水接触面之间的接触角表示。这个角的变化范围在 $0^\circ-180^\circ$ 之间。亲水岩石的润湿接触角小于 90° , 这个角越小, 孔隙表面越亲水。

憎水岩石的润湿接触角大于 90° 。强亲水岩石的润湿接触角接近 0° , 而憎水岩石的润湿接触角则趋近 180° 。当润湿接触角约为 90° 时, 岩石表面被水和油湿润的程度相同。

含油气层真正的润湿性无法直接测量, 因为岩石矿物成分、粗糙度、泥质含量、孔隙比

径(淋蚀孔)可以达到溶洞孔径那样大, 即 $0.5-1.5\text{cm}$ 或 $(0.5-1.5) \times 10^4\mu\text{m}$ 。

与砂岩相比, 石灰岩在平均孔隙半径 r 及孔隙度 m 均较大的情况下由于一部分大孔隙不连通而使其渗透率较低(图1)。

一般说来, 在细孔隙碳酸盐岩储集层中, 由地壳运动产生的裂缝甚为发育。裂缝的伸长度不同。从 $0.01-0.15$ 至 $10-20\text{m}$; 张开度从数微米到1厘米; 方向, 由无系统的水平方向和倾斜方向到油藏面积上能准确追踪到的垂直方向; 密度为每米1条至10条或更多条。在地层挠曲处及构造顶部细裂缝的密度最大。

面等变化范围很大，不可能测得油水界面的润湿接触角。现只能用间接的方法，如模拟孔隙表面的薄片法、油或水浸泡岩心法和离心法等来确定润湿性。但一致认为，实际上所有已知的含油气层几乎都是亲水的，即属水湿型油层。它们具有高的导电性能就足以说明这一点，在电测时可以利用这种特性。

含油饱和度为80—95%、含水饱和度仅为5—20%的孔隙介质，当其整个表面有一层水膜时，就可看作为导电介质。多数含油层为强烈亲水的另一个证据是从油层取出的岩心常常被泥饼（指用水基泥浆钻进时）牢牢地包裹着。从憎水油层中取出的岩样上，泥浆不会粘附，泥饼自己会脱落。完全油湿性油层或强憎水油层在油田开发实践中是很少遇见的。西西伯利亚萨雷姆油田的巴仁诺夫组含沥青泥岩层以及佐尔涅油田亲水砂岩油层B₂中的一些煤质夹层等，均属于这类油层。从亲水程度来看，碳酸盐岩层高于砂岩。孔隙介质的微观非均质性（孔隙尺寸的易变性和润湿性）是决定水或其它工作剂驱油程度的一个重要因素。

§ 4 含油层的非均质性 (宏观非均质性)

在油层研究程度很低的情况下，其宏观非均质性能很快被发现。相邻井的产量和产油能力也都会有显著差别。从油井取出的岩样，甚至用肉眼观察时，就能发现其多种性质。最普通的电测方法都能划分出井中油层厚度的差别，有否泥质薄层等。

事实上，50年代以前，无论在苏联或在美国，油田都是以均质油层这样的观念为根据进行开发的。在计算采油量时，假定整个油藏体积都均衡排油，油水界面均衡上升和气水界面均衡下降等等。

50年代中期，乌拉尔-伏尔加油气区的油田积累了许多有关边水或注入水分层水淹的实例和产层剖面注水不完全波及的实例。水只波及产层厚度的一部分（占30—40%），其余厚度仍然饱含油。同时还监测到，水沿油藏平面上不均衡推进，形成局部的滞留油地带或死油区〔36〕。

上述所有这些油田开发的结果不是个别的，也不是偶然的，这就有必要全面研究油层的非均质性及其在预测油井产量，原油开采和油层采收率时加以考虑。

目前普遍认为，实际含油层中造成非均质性的主要形式至少有三种：分层性，即油层被不渗透夹层或透镜体所分隔；单油层剖面上渗透率易变性以及沿走向油层性质的不均匀性。含油层的这些非均质性的形式会引起液体流动不均匀，降低工作剂的波及程度而影响采油。

分层性 含油层在其形成过程中由于沉积条件的变化，是一种不均质的孔隙介质，而且是渗透性含油砂岩（碎屑岩），或是灰岩和非渗透性泥岩，或是白云岩层，透镜体和小层不规则地交互层。油层分层性如此明显，以致一口井的产层剖面内可以划分出10—20小层。图2剖面上所示的层只是一些可用地球物理方法划分出的厚度大于0.5—1m的夹层和小层，而小于这一厚度范围的透镜体和夹层却分不出来。从该图上看，油藏结构是如此复杂，以致难以保证全油藏充分排油，尤其是难以通过注水或注其它工作剂保证将油完全驱入生产井。

萨莫特洛尔油田AB₂₋₃油层的纯有效含油厚度（图3）平均10.5m，从边界的一端到另一端厚度变化很大，几次减少和增加10—12m，这说明地层中砂岩系数、分层性和连续性是很不均匀的。

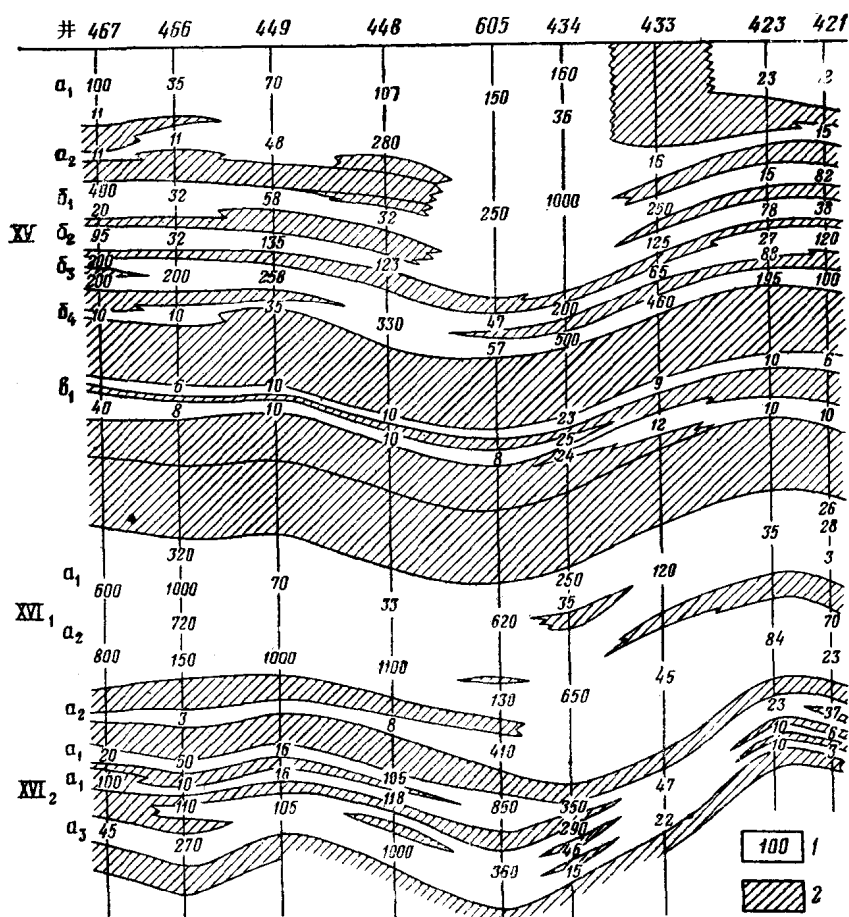


图 2 乌津油田沿467—421井XV—XVI含油层剖面
(根据地球物理资料)

1—渗透率为 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩;

2—不渗透泥岩夹层: a_1, a_2, b_1-b_4 ; b_5 —渗透砂岩夹层。

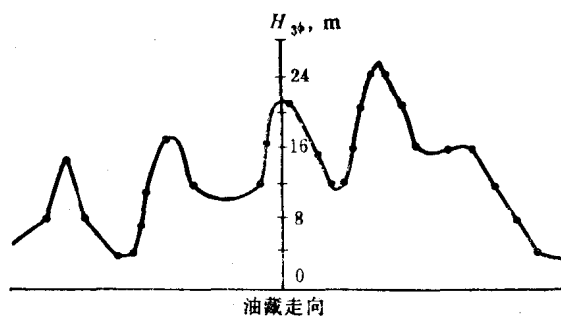


图 3 萨莫特洛尔油田AB₂₋₃层沿3671、2959、7100
三口井连接而成的剖面
线上所统计到的有效含油厚度 H_{3b} 的变化动态

分层系数 K_p 是指所有井中的渗透性小层数 n 与井数 N 的比值:

$$K_p = \sum_{i=1}^N n_i / N.$$

砂岩系数 K_s , 即是渗透性小层总厚度 h 与所有井产层总厚度 H 的比值:

$$K_s = \sum_{i=1}^N h_i / \sum_{i=1}^N H_i.$$

地层非连续性系数 K_u 是所有井中钻遇的渗透性小层总厚度(根据与非渗透层厚度 h_{nep} 对比所得)与划分出的渗透性小层、透镜体和夹层总厚度之比值:

$$K_u = \sum_{i=1}^N h_{nep} / \sum_{i=1}^N h_i$$

通常用地球物理资料确定的地层非均质性这些相当简单的特征表明: 油层被许多非渗透夹层严重地分隔着。例如, 萨莫特洛尔油田的分层系数和砂岩层系数分别为2.5—9和0.24—0.76的变化范围。

一般情况下, 油藏内所有的非渗透夹层都会使其排油和开发条件变差, 因为它们是阻止原油从任何一方向井筒流入的屏障。但在一些情况下(在油水接触带或气油接触带内), 非渗透小层或透镜体能预防油井早期水窜或气窜, 从而使这些地带的开发条件得到改善。

油层的这种非均质性目前正在进行详细的研究, 并在油田注水开发设计中可加以考虑。在全苏石油天然气科学研究院、西伯利亚石油工业科学研究所和东部地区国家石油开采工业科学研究设计所内, 建立了地层无规则的分层性影响其排油波及范围的电子计算机计算程序, 这些程序用于确定油层最终水驱原油采收率。但是, 为了应用提高油层原油采收率方法, 尤其在注入少量价格昂贵的工作剂时, 要求确实掌握所有透镜体遮挡层和屏蔽层的位置, 旨在保证有效地影响油藏整个含油部分。

渗透率的变异性 渗透率——能使液体或气体渗流的地层特有的能力——是决定驱油效率的最重要的一种性能。在碎屑岩层中, 渗透率是不同大小的孔隙分布的结果, 这样的分布取决于沉积物的致密程度、压实程度、粒级成分和胶结等因素。

在碳酸盐岩地层中, 影响渗透率的还有沉积物的次生溶解作用和位移、重结晶作用和白云岩化作用。

这些因素在形成含油层的进程中在时间上和空间上均会变化, 因此, 油层渗透率在纵向上都有变化。油层渗透率变化的规模各不相同, 由0.1—0.5m至5—500m以上。小范围内渗透率变化可以从油层全取心及其详细分析时观察到。在油藏垂向上, 油层彼此相距仅为20—30cm处的岩心样品渗透率值可能相差5—10倍以上。在油藏平面上, 根据彼此相距数百米的不同井中取出的岩心及井的产能和地球物理测井资料也可以看到渗透率的变化。

在50年代, 为了定量反映油层渗透率的非均匀性, 开始采用不同的统计分布规则(正态规则、对数-正态规则等)。在此基础上, 建立起不同的预测油藏水驱开发指标的近似方法。所有这些方法本质上均具有一个重要的假设, 即每一个渗透率值都似乎是在纵向上, 与其它层没有联系的、遍布整个油藏或部分油藏的独立的均质的渗透率。有严格分层渗滤的这一设想在相当大程度上是假定的, 因为排除液体在横向上或纵向上从某一渗透层侵入到另一渗透层的可能性是毫无根据的。液体在渗透率不均匀地层中自由流动受到限制会导致平均渗透率、产能、采液量、原油最终采收率等的计算值失真。

液体层间的流动方式在某种程度上由于地层各向异性而变差, 这种性质表现在甚至纯砂岩层内垂向平均渗透率值可以比水平方向之值低50—90%。这与岩石的压实及存在不易测定

的泥质薄夹层有关。但各向异性不可能完全阻止液体的层间窜流和选择性流动。然而液体被迫流经渗透率不同的一些层。因此，在纵横向上变化的任一液流线上渗透率的平均值都是沿各小层液流线分布的调和函数平均值。同时，很明显，在渗透率不规则分布的非均质地层中，没有条件使液体由地层底部到顶部或井与井之间无限制的“漫游”。在非均质地层中液流的自由度是受到某些条件限制的，这些条件不仅与地层非均质程度，而且与其本身的非均质特性、油井生产条件等有关。严格地说，在每一个具体情况下，对以油藏地质特征为基础建立的计算模型来说，必须确定采用什么样形式（在很大程度上用算术平均形式、调和函数平均形式还是几何平均形式）求分层渗透率平均值。

但是，现代模拟采油过程时是用以往油田开发的实际资料进行拟合的，所以确定这些渗透率值就没有什么必要了。

§ 5 原油饱和的条件

原油粘度 地下原油粘度是确定孔隙介质中原油的流动性或流度的主要性能。油层中原油流入产油井所消耗的力或能量，在其它相同条件下与原油粘度直接成正比，而渗流速度和产液量与原油粘度则成反比。

自然界中存在着粘度为 $0.4-0.5$ 至 $15000-20000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油藏。在这一类油藏中，可划分为低粘度（ $0.4-10\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）油藏，中粘度（ $10-50\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）油藏，高粘度（ $50-1500\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）油藏，重质油藏（粘度大于 $1500\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）和沥青（粘度大于 $20000-50000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）。

粘度大于 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的石油储量属于难采储量。一个油田剖面上不同油气藏或不同的产层的原油粘度可能有明显差别（差几十或几百倍）。在一个油藏范围内原油粘度同样有变化，即从油藏上部向底部或从某一区块向另一区块增加，一般相差不超过 $1.5-2$ 倍。

因为油层原油粘度是论证开发方法最重要特性之一，必须认真测定整个油藏的原油粘度。

油层原始饱和度 产油层的，孔隙介质最初是被石油和残余束缚水一起饱和的。产油层含油程度的变化范围非常宽。孔隙度为 $24-27\%$ 的高渗透碎屑岩油层含油饱和度为 $90-92\%$ ，含束缚水饱和度仅为 $8-10\%$ 。特别好的油层油、水饱和度比值达到 $10-11$ ，属于这类油层的有巴夫雷油田 D_1 层和佐尔涅油田 E_2 层。实际上西西伯利亚和西哈萨克斯坦的所有油田上，复矿碎屑岩储集层含油饱和度仅为 $60-65\%$ ，而含束缚水饱和度却为 $35-40\%$ 。油水饱和度之比仅为 $1.5-2$ 。目前，已知原始含油饱和度仅仅是 $50-55\%$ 的一些油田有霍尔莫戈尔、冬季大本营等，它们在开采时油水同出。其它已知油田，其中包括有碳酸盐岩油层的油田，其特征是储集层的油水饱和度居中。油层的原油和束缚水饱和度这样大的差异与孔隙的不同比面及孔隙大小分布情况有关。粗粒高渗透性石英砂岩比面达 $500-600\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ，且大孔隙的分布范围窄；而低渗透性和复矿碎屑岩的比面为 $30000-60000\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ，且小孔隙占很大部分。

原油和水分布 孔隙内原油和水的分布取决于孔隙表面润湿特性。亲水储集层中，水以膜状包住岩石细粒，并占据全部最小的孔隙使孔隙变窄，而油则占据其余比较大的孔隙和孔隙的中心部分。水或油均是呈连续状态分布。石油长期埋藏在孔隙介质中，部分大孔隙表面与石油接触，具有憎水性。因此在大多数情况下，实际储油层具有混合的润湿性状，即大部分水湿和部分油湿。在少数情况下，储油层以孔隙表面完全憎水或大部分憎水为特征。在这

些情况下水占据一些最大的孔隙，而且呈不连续状态分布。

所有油田的地下原油均含溶解的烃类气体。常发生原油中气体欠饱和以及地层压力高于饱和压力的情况。但在很多油田的一些油层中，原油含气达到极限，多余的气体在油藏上部会形成规模不同的气顶。有时气顶的体积会超过油藏体积。在这些油气藏中，可动油气水是严格地按重力分布的，但在上部的气顶中，经常有不可动的水和原油存在，在中部纯油带中有残余的不可动水存在，在下部含水区内有残余不可动油存在。

第二章 采油、残余油饱和度

自然界原始状态的油藏均处于许多保持平衡的大小不等的内力和外力作用下。

通常,当石油处在孔隙地层褶皱或背斜构造上部时,常受到静水压力和边水压头的作用。油层承受着岩层压力——上覆地层岩石的重量。油上方可以有显示油藏压力的气顶。在油藏内部,油、气、水、岩石等的弹性力会起作用。充满地层的这些介质具有不同的密度,在油藏中按重力分布。油和水,这两种互不相溶的液体,当在小孔隙和毛细管中相互接触时会承受着表面分子力作用,而在与孔隙固体表面接触时,则承受着润湿性张力的作用。这些力的自然平衡状态由于钻开油层和降低油层压力而遭受破坏时,会出现更加复杂的现象,一些力占优势,并超过另一些力,从而导致液体运动和孔隙介质中饱和程度的改变。

§ 1 液体运动中天然能量的显示、 地下液体的弹性

油层采液,会引起油层压力下降,如果在油层中没有不渗透层(隔挡层),则压力下降的涉及范围就难以限制。在油层压力下降的同时,孔隙介质体积会缩小以及液体会膨胀,依靠这些能量可从油层采出的总液量就取决于油层和液体的弹性(油层和液体的压缩系数)、它们的体积和压降:

$$Q_{\Sigma} = (p_{\text{нач}} - p_{\text{тек}}) V_{\Sigma} \beta^*$$

式中 $p_{\text{нач}}$, $p_{\text{тек}}$ ——分别为原始油层压力和目前油层压力;

V_{Σ} ——压降部分的油层体积;

β^* ——油层的弹性容积系数,其计算公式为

$$\beta^* = m\beta_{\Sigma} + \beta_{\text{ср}}$$

式中 m ——油层孔隙度, %;

β_{Σ} , $\beta_{\text{ср}}$ ——分别为液体和孔隙介质的压缩系数。

在具有常规的油层物性和原油性质的封闭油藏中(在碳酸盐岩储集层中)油层压力下降10MPa时,依靠弹性能量而不考虑井网就能从中采出液量不少于1.5—2.5%。

边水压头 假如油藏面积不大,且与边外含水区有活跃的水动力联系,则可以采用边水或底水的弹性水压驱动方式开采,油层压力不会明显下降。在这种驱动方式下,原油采出程度随原油粘度、井网和其它等因素而变化,其范围很宽,从0.2—0.3至0.6—0.7(按平衡表储量)。

脱出气的膨胀 在油层生产能力很低,油藏与含水区连通性变差且其面积较大的条件下,油层压力最终将降低,达到饱和压力或低于饱和压力,这时从原油中开始脱气,其膨胀能力与压力成反比,从而能排挤出更多的原油。依靠液体中脱出气体的膨胀能量(溶解气驱方式),地下原油采出程度随油气比和原油粘度(通常,这两个参数彼此相关)变化而从5—8至20—25%。高粘原油(粘度超过25—30mPa·s)具有低油气比(小于20—25m³/t),且其溶解气驱的采收率最低(约5—6%)。低粘原油(小于1—2mPa·s)具有高油气比(达