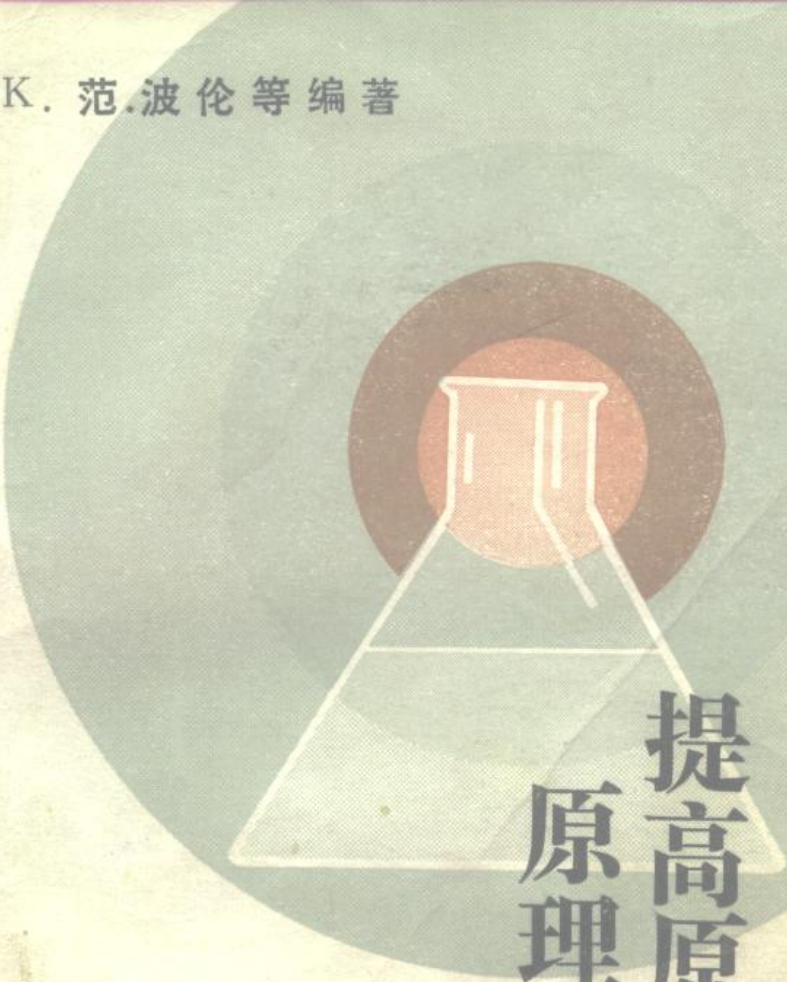


H. K. 范.波伦等编著



提高原油采收率的 原理

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了目前国外文献中公认的各种提高石油采收率方法。这些方法分为三类，即热力采油法、混相驱油法和化学驱油法。书中对各类中的每一种提高石油采收率方法都作了技术评述并提出了油田试验实例。

本书供油田开发开采工程技术人员及石油院校开发开采专业师生参考。

H.K. Van Poollen

Fundamentals of Enhanced Oil Recovery

Pennwellbooks Oklahoma 1980

提高原油采收率的原理

〔美〕H.K. 范·波伦等编著

唐养吾 杨贵珍 译

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲36号）

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 10³/₄ 印张 281千字 印3,601—11,600

1983年12月北京第1版 1984年12月北京第2次印刷

书号：15037·2430 定价：1.35元

序 言

近二十年来，科学家们一直在探索从枯竭的油层中采出更多原油的技术，因为这些枯竭油层含有的原油占原始地质储量的50%。单以美国而言，就有1000亿桶原油仍然剩留在枯竭油层内。

在今后十年内，世界上用一般方法采出的油量将不可能满足对能源的要求。因此，油价将继续上涨。据有些人推测，油价上涨有可能使提高原油采收率方法具有很大的经济吸引力，并有可能出现一个非常规石油资源成为很经济的纪元。这些非常规的可能石油资源包括油页岩、焦油砂、稠油，以及提高已知油藏的采收率。

从长远来看，即使新油田的发现越来越少，石油工业的未来确实仍是光明的。不断上涨的油、气价格不仅可以改善提高原油采收率方法的经济效果，而且还可能为大规模地开发太阳能、核能和地热等非矿物能源铺平道路，尤其是自从提高原油采收率的施工费用随着油价上涨而增加以来，更是如此。

虽然石油是一个很方便而又用途很广的能源，但它不能重复再生。然而，应用提高原油采收率技术，有可能在未来的许多年内提高现有产油水平，或者保持现有产油水平。因此，为了满足市场对能源的要求，必须发展提高原油采收率技术，充分发挥它们的潜力。只有对每一提高原油采收率方法，在理论研究、实验室试验和现场应用方面自由地进行资料交流，才有可能实现这一目标。

《提高原油采收率的原理》汇集了已发表的各种提高采收率方法的资料。对每一公认方法的技术问题进行了全面的评述，并

提出了方法选择的一般标准。

本书对所有方法都进行了讨论，目的在于能够应用这些方法进行经济的采油，或取得更大的经济收益。也就是要达到更短的补偿时间。提高采收率方法可以使不动原油变为可动的，但是，除少数方法外，对于大部分方法来说，要取得很大的经济收益可能还是值得怀疑的。

本书是很多人共同努力的结果。根据 H. K. 范·波伦 (H. K. Van. Poollen) 和联合公司的要求，M. A. 萨贝特 (M. A. Sabet) 编写了热力采油法和混相烃驱油法各章，J. C. 巴普蒂斯特 (J. C. Baptist) 编写了二氧化碳驱油法和惰性气体驱油法各章。根据艾克佐尹尔服务公司的要求，H. 萨卡罗 (H. Surkalo) 编写了化学驱油法各章。

H. K. 范·波伦

目 录

概要.....	(1)
导言.....	(12)
第一部分 热力采油法.....	(13)
第一章 蒸汽刺激法.....	(13)
§ 1. 引言.....	(13)
§ 2. 技术讨论.....	(14)
1. 模型研究.....	(14)
2. 实验室研究.....	(21)
§ 3. 油田试验实例.....	(22)
1. 蒂·朱安纳油田 (委内瑞拉)	(23)
2. 杜里油田 (印度尼西亚)	(25)
3. 亨廷顿滩油田 (美国加利福尼亚州)	(28)
参考文献.....	(31)
第二章 蒸汽驱油法 (包括注热水)	(37)
§ 1. 引言.....	(37)
§ 2. 技术讨论.....	(40)
1. 蒸汽性质.....	(40)
2. 模型研究.....	(42)
3. 实验室研究.....	(57)
4. 井筒热损失.....	(60)
5. 地面热损失.....	(64)
6. 原油采收率计算.....	(69)
§ 3. 结论.....	(72)
§ 4. 油田试验实例.....	(74)
1. 南贝尔里吉油田 (美国加利福尼亚州)	(74)
2. 蒂·朱安纳油田 (委内瑞拉)	(77)

3. 斯乔尼别克油田 (荷兰)	(81)
4. 卡特·卡里昂油田 (美国加利福尼亚州)	(85)
参考文献	(88)
第三章 火烧油层	(96)
§ 1. 引言	(96)
§ 2. 技术讨论	(100)
1. 点火	(100)
2. 空气需要量	(103)
3. 实验室研究	(109)
4. 模型研究	(110)
5. 经济评价	(112)
6. 原油采收率	(113)
§ 3. 结论	(113)
§ 4. 油田试验实例	(114)
1. 斯洛史油田 (美国内布拉斯加州)	(114)
2. 米加油田 (委内瑞拉)	(116)
3. 海德勒伯格油田 (美国密西西比州)	(118)
参考文献	(119)
第二部分 化学驱油法	(125)
第四章 表面活性剂-聚合物驱油法	(125)
§ 1. 引言	(125)
§ 2. 技术讨论	(129)
1. 表面活性剂段塞	(129)
2. 连续相	(129)
3. 流动度控制	(130)
4. 表面活性剂吸附	(134)
5. 石油磺酸盐	(138)
6. 相图	(140)
7. 实验室设计	(143)
8. 各种表面活性剂-聚合物方法的介绍	(148)
§ 3. 油田处理系统	(152)
1. 水处理系统	(152)

2. 表面活性剂段塞混合系统.....	(153)
3. 聚合物混合系统.....	(154)
4. 流体注入系统.....	(155)
§ 4. 油田试验实例.....	(156)
1. 鲁宾逊119-R方案 (美国伊利诺斯州)	(156)
2. 鲁宾逊219-R方案 (美国伊利诺斯州)	(157)
3. 鲁宾逊M-1方案 (美国伊利诺斯州)	(158)
4. 北布尔班克油田试验方案 (美国俄克拉荷马州)	(159)
参考文献.....	(160)
第五章 聚合物驱油法	(179)
§ 1. 引言.....	(179)
§ 2. 技术讨论.....	(179)
1. 油层的非均质性.....	(179)
2. 流度比.....	(180)
3. 聚合物的化学性质.....	(181)
4. 驱替机理.....	(183)
§ 3. 油层选择.....	(199)
§ 4. 实验室设计.....	(200)
§ 5. 可行性分析.....	(201)
1. 例一.....	(201)
2. 例二.....	(203)
§ 6. 油田处理系统.....	(207)
1. 聚合物混合系统.....	(207)
2. 流体注入系统.....	(208)
§ 7. 油田试验实例.....	(209)
1. 东科林加油田 (美国加利福尼亚州)	(209)
2. 北斯坦利油田 (美国俄克拉荷马州)	(210)
参考文献.....	(210)
第六章 碱性水驱油法	(222)
§ 1. 引言.....	(222)
§ 2. 技术讨论.....	(222)
1. 岩石性质.....	(222)

2. 驱替机理.....	(224)
3. 化学剂.....	(226)
4. 实验室设计.....	(226)
5. 实验室岩心驱替试验.....	(228)
6. 油田应用.....	(229)
§ 3. 油田试验实例.....	(229)
1. 森尔顿 (Singleton) 油田 (美国内布拉斯加州)	(229)
2. 北瓦尔德-依斯泰斯 (North Ward-Estes) 油田 (美国得克萨斯州)	(229)
3. 中途日落油田 (美国加利福尼亚州)	(230)
参考文献.....	(230)
第三部分 混相驱油法	(241)
第七章 混相烃驱油法	(241)
§ 1. 引言.....	(241)
§ 2. 技术讨论.....	(246)
1. 实验室研究.....	(246)
2. 模型研究.....	(255)
§ 3. 结论.....	(255)
§ 4. 油田试验实例.....	(256)
1. 中途日落油田 (美国加利福尼亚州)	(256)
2. 帕宾那油田 (加拿大)	(260)
3. 平地油田 (美国得克萨斯州)	(266)
4. 前溪 (Ante Creek) 油田 (加拿大)	(270)
5. 三十一区块油田 (美国得克萨斯州)	(273)
6. 斯旺桑河 (Swanson River) 油田 (美国阿拉 斯加州)	(275)
7. 哈西-迈莎乌德 (Hassi-Messaoud) 油田 (阿尔 及利亚)	(275)
参考文献.....	(277)
第八章 二氧化碳驱油法	(282)
§ 1. 引言.....	(282)
§ 2. 技术讨论.....	(282)

1. 应用二氧化碳驱油法的原则·····	(282)
2. 相态特性和混相特性·····	(285)
3. 驱替机理·····	(288)
4. 试验方案设计·····	(289)
5. 二氧化碳来源·····	(291)
§ 3. 结论·····	(294)
§ 4. 油田试验实例·····	(296)
1. 克利斯奈德油田 (美国得克萨斯州) ·····	(296)
2. 克罗塞托油田 (美国得克萨斯州) ·····	(302)
3. 米德-斯托拉文油田 (美国得克萨斯州) ·····	(303)
4. 瓦桑油田 (美国得克萨斯州) ·····	(305)
参考文献·····	(307)
第九章 惰性气驱油法 ·····	(318)
§ 1. 引言·····	(318)
§ 2. 技术讨论·····	(319)
1. 应用原则·····	(319)
2. 相态特性和混相驱替·····	(319)
§ 3. 结论·····	(322)
1. 惰性气驱油法的优点·····	(322)
2. 惰性气驱油法的缺点·····	(323)
§ 4. 油田试验实例·····	(323)
1. 三十一区块油田 (美国得克萨斯州) ·····	(323)
2. 哈肯斯 (Hawkins) 油田 (美国得克萨斯州) ·····	(325)
参考文献·····	(325)
第四部分 结论 ·····	(331)
第十章 应用提高采收率方法的现状 ·····	(331)

概 要

提高原油采收率方法汇编对目前文献中公认的各种提高原油采收率方法进行了评述。这些方法可以细分为三大类，如：

第一部分 热力采油法

蒸汽刺激法（或蒸汽吞吐法）

蒸汽驱油法（包括注热水）

火烧油层

第二部分 化学驱油法

表面活性剂-聚合物驱油法

聚合物驱油法

碱性水驱油法

第三部分 混相驱油法

混相烃驱油法

二氧化碳驱油法

惰性气体驱油法

对每一个提高原油采收率方法都作了技术评述，并提出了油田试验实例。另外，还提出了参考资料。下面对每一提高原油采收率技术作些扼要的介绍。

提高采收率方法

1. 蒸汽刺激法

蒸汽刺激法也就是人所共知的循环注蒸汽、蒸汽浸泡或蒸汽吞吐。采用蒸汽刺激法时，通常是在2~3周内每天向生产井注入1000桶蒸汽。注入蒸汽后，关井数天使足够的热量得以扩散，然后开井生产。注入蒸汽的热提高了油层的温度，因而显著地提高

了重油的流动度，并相应地提高了重油的产量。可能对提高产量有贡献的其他因素包括：1)流体热膨胀；2)溶解气体压缩；3)减少残余油饱和度；4)井筒清洗效应。如果蒸汽刺激法应用得很成功，费用就可以很快地得到补偿，因而这个方法获得广泛的应用，但也有文章报道，有许多试验方法失败了，主要原因是设计不合适。

许多油田初步采用蒸汽刺激法后所获得的增产油量要比模拟研究所预测的高得多。增产的主要原因在于井筒附近得到清洗，渗透率得到改善。许多油井都经过若干次循环处理；但几乎所有的报道都指出，第二次蒸汽刺激周期的增产产量都比第一次少，而且每一循环周期也越来越短。

这一提高采收率技术主要是增产方法。许多经营者在应用了几次循环注蒸汽后就转为蒸汽驱。

2. 蒸汽驱油法（包括注热水）

蒸汽驱与注水过程相似。需要选择适当的井网，将蒸汽注入一部分井中，而从邻近井采出原油。如果蒸汽在注入井周围形成一个饱和带，这种情况将是很理想的。这一饱和带的温度几乎等于注入蒸汽的温度。当蒸汽离开注入井向外扩散时，压力逐渐下降，因而蒸汽的温度亦下降。蒸汽离开注入井一定距离后，便开始冷凝，逐渐形成热水带。在蒸汽带内，蒸汽的蒸馏液和气体（蒸汽）驱动着原油前进。在热水带内，原油和岩石的性质开始发生物理变化，这对原油增产是有利的。这些变化是：原油热膨胀，原油粘度和残余油饱和度降低，相对渗透率变化。

大多数蒸汽驱都是采用 ± 5 英亩井网，但其他参数变化范围很大，每一个方案都不一样。初期的投资是很庞大的，所以在设计和实施时必须小心谨慎。必须避免过多的热损失（地面和油层内）和机械事故。

蒸汽驱油法是当前主要的提高原油采收率方法。仅美国加利福尼亚州蒸汽注入井的井数就从1966年的140口增加到1975年的

1630口。更令人鼓舞的是，全世界蒸汽驱的日采油量达到了405000桶，其中美国240000桶/天，委内瑞拉148000桶/天，加拿大9000桶/天，其他国家8000桶/天。而蒸汽刺激加火烧油层的采油量是55000桶，其他各种提高采收率方法的日采油量是221000桶。

注蒸汽胜过其他提高采收率方法的地方在于，蒸汽可以应用于各种各样的油层。两个限制条件是：深度应小于5000英尺和油层厚度应大于10英尺。深度限制是由于蒸汽的临界压力(3202磅/英寸²)造成的；而油层厚度则是由盖层和底层的热损失速度决定的。

设计蒸汽驱方案时，要对蒸汽的性质、蒸汽和水驱替原油的物理机理有清楚的了解。为了恰当地计算出所需要的蒸汽发生设备的能力也有必要计算出热损失。

注热水常用于原油粘度范围在100~1000厘泊的油层。注热水过程中，在地面、井筒和油层内损失的热量非常大，因此一般情况下还是倾向于注蒸汽。此外，注热水的矿场试验常常是不成功的，因为常发生热水指进和低体积扫油效率。

3. 火烧油层

火烧油层有两种根本不同的方法：1)正向燃烧法；2)反向燃烧法。正向燃烧时，是在空气注入井的附近将油层点燃，燃烧前缘由注入井向外传播。连续注入空气驱动着燃烧带穿过油层达到附近的生产井。

反向燃烧过程在开始时采用的方法与正向燃烧相同，但从点火井向外燃烧一段短距离之后，即转为向邻近井注空气，驱动着原油向原来的点火井推进，而燃烧前缘却从点火井向邻近井移动，与原油运动的方向恰好相反。这一技术是作为提高特重原油油层的采收率方法而发展起来的。

火烧油层曾成功地在各种物理特性的油层内进行了试验，因此具有广泛应用的前景。曾有几个试验方案在技术上是成功的，

但却不能获得盈利。在为火烧油层方案提供资金之前，必须精确地确定出方案的经济效果。

正向燃烧法有许多类型。湿式燃烧和局部淬火燃烧就是其中的两种类型。虽然这些方法尚未超出实验室试验和小型矿场试验的范围，但一致的看法是，这些方法可以提供出比干式燃烧法高得多的潜力。在干式燃烧过程中，大量的热遗留在燃烧带内，并通过油层顶部和底部岩石而散失掉。如果在注空气的同时注入适量的水，水离开注入井一段短距离后，便闪蒸为过热蒸汽。当过热蒸汽与空气混合，一起到达燃烧前缘时，在燃烧过程中仅消耗了氧。过热蒸汽穿过燃烧前缘时，便与空气中的氮和主要由CO和CO₂组成的废气混合。这种气体混合物在燃烧带的前面驱动着原油前进。实验室的结果表明，最佳湿式燃烧需要的空气量，只有干式燃烧所需要空气量的三分之一。

控制火烧油层的空气需要量的主要因素是：被燃烧原油中的燃料（焦炭）含量和氧气的利用效率。只有当焦炭消耗完以后，燃烧带才开始移动。如果从原油中沉淀出的焦炭过多，那么燃烧带推进的速度将会是很慢的，而且空气的需要量将是很高的。然而，如果不能提供足够的燃料，那么燃烧过程就不能维持。

正确设计一个火烧油层方案取决于对许多参数的正确计算。在实验室对燃料含量和空气需要量进行研究，可以确定出开始进行矿场试验的可能性。

4. 表面活性剂-聚合物驱油法

这个方法分两步进行：1)注入表面活性剂段塞；2)注入聚合物流动度缓冲带。表面活性剂段塞可以是胶束溶液、微乳液、可溶性油，以及膨胀胶束。使用表面活性剂的主要目的是降低界面张力，以驱替出注入水无法驱替出的原油。使用聚合物的目的是为了控制流动度，以便实现更有效的活塞式驱替。

在油田的实际应用中，表面活性剂-聚合物体系是很难控制和预测的。由于段塞通过油层时会发生连续的化学反应和变化，

因此实验室模拟通常不能反映整个油田的情况。表面活性剂-聚合物方法具有很大的潜力，但还需要进行更多的矿场试验。

有两种不同的表面活性剂驱油方法：高浓度的表面活性剂段塞和低浓度的表面活性剂段塞。除了表面活性剂的浓度之外，这些段塞还含有不同量的助表面活性剂（醇类）、水、碳氢化合物和盐类。这些成分的浓度变化可以形成无数的段塞配制方案。

表面活性剂在油层岩石上的吸附作用是段塞设计中需要考虑的重要问题。表面活性剂的吸附作用是段塞遭到破坏的主要原因之一。当量较高的磺酸盐是降低界面张力的主要成分，但也很容易被吸附。吸附作用一旦发生，段塞促使原油流动的能力就会降低。

有些作者认为，在注入表面活性剂段塞之前，注入预冲洗液可以减少吸附。实验室的岩心驱替表明，注入预冲洗液是一个切实可行的方法。

为了在油田上应用，曾对表面活性剂-聚合物的设计进行过研究，大部分研究都考虑用直观方法确定地层原油和盐水在表面活性剂段塞中的增容量。研究中还测定了界面张力，并利用它对各种段塞进行筛选。所有的公司都把原油采收率看作是表面活性剂-聚合物体系是否有效的尺度。在试验中，通常是使用贝瑞（Berea）岩心，但最后的设计工作总是用油层岩心进行。

对这个方法虽已进行了大量的实验室研究，但尚未见到经济效益较好的矿场试验的报道。这个方法具有能采出大部分地下残余油的潜力。只要继续坚持研究和继续进行油田试验，将来就有可能使这个方法获得普遍的应用。

5. 聚合物驱油法

聚合物驱油法主要是向注入水中添加稠化剂，提高水的粘度。虽然加入聚合物对最终残余油饱和度没有实质上的影响，但可以得到两个好处：1)可以减少为达到最终残余油饱和度所需要的总注入水量；2)可以改善流度比，提高扫油系数。曾经报道过的经

济上成功的方案变化范围是很大的。成功的方案所增加的采收率约为5~15%。许多经济上无效益的方案都是由于在试验开始前对油层特性未进行充分研究而造成的结果。

目前用于提高采收率的聚合物分为两类：聚丙烯酰胺和多糖。

聚丙烯酰胺的类型有很多种，分子量的变化范围从几十万到几百亿。可以购买到干的，乳状的或胶冻状的聚丙烯酰胺。每一磅聚丙烯酰胺的价格为1.5美元到2.25美元，通常使用的浓度为50~100ppm。由于聚丙烯酰胺可以降低油层岩石的渗透率，因而可以降低注入流体的流动度。一般情况下，渗透率的降低直接与聚合物的分子量有关。砂岩油层的孔隙几何形状变化很大，因此渗透率下降的程度不能仅仅根据岩石的渗透率值来确定。例如，个别聚丙烯酰胺对某一渗透率为100毫达西的油层可能是很理想的，但对于另一渗透率为100毫达西的油层则有可能完全产生堵塞。为此，必须首先取得实验室资料，以确定某一特定聚合物的适用性。

由于聚丙烯酰胺提高了注入流体的粘度，因而只要稍微降低油层岩石的渗透率，就可以降低注入流体的流动度。根据油层渗透率大小，就可以决定在注入生物聚合物之前是否需要过滤。关于聚合物流过多孔介质的流动特性，曾在实验室内进行了大量的研究工作。由于聚丙烯酰胺溶液的流动特性太复杂，难以用单一的粘度参数加以描述，因此将聚丙烯酰胺溶液称之为非牛顿流体。尽管聚丙烯酰胺的流动特性复杂，但它的视粘度明显地高于水的粘度。影响聚合物特性的其他因素是：1)溶剂和盐的浓度；2)分子量；3)水解程度。

聚合物流经多孔介质时，还应考虑到滞留，吸附，不可进入孔隙体积和聚合物引起的捕获现象。

具有挠性长链的聚丙烯酰胺对剪切降解很敏感。这种降解将聚合物链断裂为若干短分子链。在油田上处理这些聚合物时，为

了将剪切的影响减少到最低限度，应该特别小心。

6. 碱性水驱油法

苛性水驱油法或碱性水驱油法是将注入水的pH值控制在12~13左右，这样就可以提高采收率，使之超过普通注水的采收率。

正在注水的油田可以很容易地转为苛性水驱，只要在水中加入1~5%(重量)的NaOH就可实现。到目前为止，仅报道过少数几个矿场的小型试验，而且结果不是令人鼓舞的。还需要进行大量更深入的研究，以便更好地理解该方法之所以能提高采收率的机理和恰当的选择能够应用这一方法的油层。? Δ

虽然对碱性水驱的优点早就有了认识，但对提高原油采收率的机理实际上还未完全了解。目前，至少提出了六个机理：

- 1) 降低界面张力；
- 2) 润湿性从亲油变为亲水；
- 3) 润湿性从亲水变为亲油；
- 4) 乳化作用和捕获作用；
- 5) 乳化作用和夹带作用；
- 6) 增溶油水界面上的刚性薄膜。

向注入水中加入苛性物以后，便可以产生以上有利于提高最终采收率的机理，看来可以提出某些合理的实验方法，以便能够用以评价油层的潜力。这样，最终目标应该是确定取得的效果，而不必追求主要机理是什么。

苛性水驱的经济效果是引人注目的，因为使用化学剂的投资，要比其他大多数提高采收率方法的投资低。虽然最终采收率可能增加得不太多，但经济收益是很明显的。

7. 混相烃驱油法

混相烃驱油的过程包括注入可以完全溶解油层原油的流体，消除引起原油滞留于岩石中的力，以及将溶剂-原油混合物驱替到生产井。这种溶剂可以是醇类，精制烃，凝析的碳氢化合物气体，

液化石油气或废气。

首先注入溶剂段塞（与油层原油混相）。接着注入流体和气体将溶剂-原油的混合物驱替到生产井。令人遗憾的是，当溶剂（混相段塞）通过油层时，含油的浓度越来越高，因而改变了段塞的成分，使它溶解油的能力不断减弱。目前，有很多成功的混相烃驱油试验方案还正在进行。油层的参数变化范围很大。

有三个不同的混相烃驱油法可以用于提高原油采收率。第一个方法就是人所共知的混相段塞法，这个方法包括注入50%孔隙体积的液体碳氢化合物段塞，然后注入天然气，或气体和水，以便驱动段塞通过油层。第二个方法是注富气，即先注入富化天然气段塞，接着注入干气或干气和水。段塞尺寸通常是孔隙体积的10~20%，主要由乙烷——己烷（ C_2-C_6 ）组成。第三个方法是高压注干气法，它包括在高压下注入干气，引起原油反蒸发并在注入气和原油之间形成由 C_2-C_6 组成的混相带。因此，富气法和高压注干气法之间的差别在于：采用富气法时，注入的 C_2-C_6 成分由气体转变成为液态；而采用高压干气法时，原油中的 C_2-C_6 则由液态转变成为气体。

设计混相烃驱油法通常需要进行实验室模型研究，然后进行小型矿场试验。设计需要的油层参数包括：油层深度和厚度，原油粘度，油层温度和压力，渗透率和地层倾角。研究中将确定出最佳段塞尺寸，注入速度和采收率。

8. 二氧化碳驱油法

二氧化碳和油之间形成混相的机理与烃类混相驱中高压注干气的机理类似。虽然二氧化碳与地层原油初次接触时并不能形成混相，但在合适的压力、温度和原油组分的条件下，二氧化碳可以形成混相前缘。在适当条件下，气体将从原油中抽出较重的碳氢化合物，并不断使驱替前缘的气体浓缩。于是，二氧化碳和原油就变成混相的液体，形成单一液相，从而可以有效地将地层原油驱替到生产井。